



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Janne Hupponen

Jäteveden lämmöntalteenottojärjestelmä asuinkerrostalossa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Talotekniikka

Insinöörityö

8.4.2020

Tekijä Otsikko	Janne Hupponen Jäteveden lämmöntalteenottojärjestelmä asuinkerrostalossa
Sivumäärä Aika	44 sivua + 2 liitettä 8.4.2020
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	talotekniikka
Ammatillinen pääaine	LVI-suunnittelu
Ohjaajat	yliopettaja Jukka Yrjölä DI Henrik Heininen
<p>Uudisrakennusten energiatehokkuus on parantunut viime vuosina merkittävästi. Ulkovai- pan lämmöneristävyysvaatimuksia on kiristetty ja poistoilmasta otetaan lämpöä talteen te- hokkailla LTO-laitteilla. Uudiskerrostaloissa käyttöveden lämmitykseen kuluukin noin puo- let koko lämmitysenergian tarpeesta. Lämmitetty käyttövesi johdetaan tyypillisesti kunnalli- seen jätevesiviemäriin ilman, että viemäriverdestä otetaan lämpöä talteen. EU on asettanut jäteveden lämmöntalteenoton uusiutuvaksi energianlähteeksi direktiivissä RED II.</p> <p>Tämä insinöörityö tehtiin talotekniikan suunnittelutoimistossa liittyen Helsinkiin kaavaillun suuren asuinkerrostalon LVI-suunnitteluun. Rakennus liitetään kaukolämpöverkkoon. Työn tavoitteena oli selvittää jäteveden lämmöntalteenottomahdollisuuksia, lämmöntalteenotto- laitteiston toimintaa ja kytkentää lämmönjakokeskuksen laitteisiin sekä jäteveden lämmön talteenoton kannattavuutta. Järjestelmä ajateltiin sijoitettavaksi asuinkerrostalon tekniseen tilaan lämmönjakohuoneeseen.</p> <p>Työ tehtiin kirjallisuustutkimuksena, perehtymällä alan viranomaismääräyksiin ja ohjeisiin sekä haastatteluin ja omakohtaisin laskelmin. Jäteveden lämmöntalteenoton energia- ja kannattavuuslaskelmissa tukeuduttiin laitetoimittajan ilmoittamiin arvoihin. Jätevedet pum- pataan kahden sarjaan kytketyn lämmöntalteenottosiirtimen läpi kunnalliseen viemäriver- kostoon. Lämmönsiirtimet ovat säiliöissä, joista lämpö siirretään liuoskierrolla lämpöpum- pulle. Lämpöpumppu tuottaa lämpöä käyttöveden lämmittämiseen ja lattialämmitysverkos- toon.</p> <p>Lopputuloksena todettiin, että jäteveden lämmöntalteenottojärjestelmä on varteen otettava talotekninen ratkaisu ja järjestelmä maksaa itsensä takaisin. Vaikutus E-luvun parantumi- seen oli noin $-5 \text{ kWh}_E/(\text{m}^2\text{a})$. Tärkeimpänä jatkotutkimustarpeena ovat pitkäaikaiset seu- rantamittaukset jäteveden LTO-laitteistojen toiminnasta ja suorituskyvystä erilaisissa koh- teissa. Niillä saataisiin jatkossa luotettavaa tietoa suunnittelun tueksi.</p>	
Avainsanat	jätevesi, lämpöenergia, lämpöpumppu, lämmöntalteenotto

Author Title	Janne Hupponen Wastewater Heat Recovery System in Apartment Building
Number of Pages Date	44 pages + 2 appendices 8 April 2020
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Building Services Engineering
Professional Major	HVAC Design
Instructors	Jukka Yrjölä, Principal Lecturer Henrik Heininen, M.Sc. (Tech.)
<p>The Bachelor's thesis examined the profitability of a wastewater heat recovery system for a future apartment building. The technical implementation of the system was designed so that wastewater was routed through two heat recovery heat exchangers to a heat pump and this reusable energy was used in the hot water and the underfloor heating circuit.</p> <p>The thesis was carried out as literature research based on local authority standards and regulations, by making interviews and personal calculations. The energy and profitability calculations were based on the values provided by the appliance distributor. The sources provided an overall picture of the operation and technical implementation of the wastewater heat recovery system.</p> <p>In conclusion, a wastewater heat recovery system is a significant technical building solution that pays itself back. Its effect on energy improvement was $-5 \text{ kWh}_E/(\text{m}^2\text{a})$. Further research should be conducted as long-term tracking and measuring of the wastewater heat recovery function and performance in several settings. That would provide necessary information to support the system design.</p>	
Keywords	sewage, heat energy, heat pump, heat recovery

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Määräykset	2
2.1	Suomen rakentamismääräyskokoelma	2
2.2	Euroopan unioni	4
2.3	Kytkeä kaukolämpöön	5
2.3.1	Rakennuksen kaukolämmityksen määräykset ja ohjeet	5
2.3.2	Helenin ohje hybridikytkennästä kaukolämpölaitteiston rinnalle	9
3	Rakennuksen energiakulutukset	11
3.1	Taseraja ja energian tarve	11
3.2	Hyötysuhteet	14
3.3	Energiatehokkuus	16
4	Lämmönsiirtyminen ja lämpöpumput	19
4.1	Lämmönsiirtyminen	19
4.2	Lämpöpumpun toimintaperiaate	21
4.3	Lämpö- ja kylmäkerroin	23
5	Jäteveden LTO:n potentiaali ja käyttöveden kulutusjakauma	24
5.1	Jäteveden LTO:n potentiaali	24
5.2	Käyttöveden kulutusjakauma	31
6	Tutkimiskohteen esittely	32
6.1	Rakennuksen esittely	32
6.2	Jäteveden LTO-järjestelmän toiminta	33
7	Jäteveden LTO-järjestelmällä saavutettavat säästöt	35
7.1	Kustannusarvio	35
7.2	Kirjallisuustutkimuksen tulokset	36

7.3	Elinkaaren tarkastelujakso	38
8	Yhteenveto	39
	Lähteet	42
	Liitteet	
	Liite 1. Ecowec-hybridivaihdin R10, mittatiedot	
	Liite 2. Thermia Mega ^L -lämpöpumppu, tekniset arvot	

Lyhenteet

CF Kassavirta

kWh_E/(m²a) Rakennuksen tai sen osan kokonaisenergiankulutus

LTO Lämmöntalteenotto

RakMK Suomen rakentamismääräyskokoelma

1 Johdanto

Nollaenergiatavoitteiden lisääntyessä vuoden 2018 alussa voimaan tulleiden asetusten myötä rakennusten energiatehokkuuteen ja teknisiin järjestelmiin kohdistuu entistä enemmän vaatimuksia. Suomessa lisää haastetta aiheuttavat sekä suuret kosteusvaihtelut että lämpötilavaihtelut kesän ja talven aikana. Talotekniikalta vaaditaan paljon mukautuvuutta nykyisiin erilaisiin teknisiin järjestelmiin, jotta voidaan tehdä terveellinen, turvallinen ja energiatehokas rakennus.

Asuinkiinteistössä vaipan lämmöneristys on hyvällä tasolla ja niiden poistoilmasta otetaan lämpöä talteen tehokkailla laitteilla, mutta jäteveden lämpöenergiaa johdetaan usein viemäriin hyödyntämättä sitä lämmitysjärjestelmiin. Tähän haasteeseen on nyt pyritty kiinnittämään entistä enemmän huomiota, jotta voitaisiin tehdä energiatehokkaampi rakennus. Lämpimän käyttöveden lämmitys edustaa noin puolta uudiskerrostalon lämmityskustannuksista, joten kyseessä on huomattava määrä lämmitysenergiaa, jota voidaan ottaa talteen.

Jäteveden keskilämpötila on melko matala, jolloin sen hyödyntäminen suoraan lämmitysjärjestelmiin on hankalaa. Lämpöpumpulla jätelämpövirrasta saatua lämpöä voidaan nostaa korkeammalle lämpötilatasolle. Näin jätevedestä saatavaa lämpöenergiaa voidaan hyödyntää monipuolisemmin. Lämpöpumput ovatkin lisääntyneet suuresti talotekniikassa, koska niillä on päästy merkittäviin säästöihin ja samalla on vähennetty haitallisia päästöjä.

Tämä insinöörityö on tehty Hepacon Oy:lle tavoitteena tutkia jäteveden lämmöntalteenottojärjestelmän kannattavuutta. Jäteveden lämmöntalteenottojärjestelmät ovat alkaneet yleistymään asuinkerrostaloissa uusien asetusten myötä. Se herättää paljon mielenkiintoa lämmitysjärjestelmien parissa.

Hepacon Oy on Suomen suurimpia kotimaisessa omistuksessa olevia talotekniikan suunnittelu- ja konsultointitoimistoja. Yrityksessä on tällä hetkellä yli 60 työntekijää. Toimipisteet ovat laajentuneet jopa Ouluun asti, jossa on tällä hetkellä avattu uusi konttori.

Insinööriyö liittyy kaukolämpöverkkoon liitettävään uudiskerrostaloon, jossa on torniosa ja lamelliosa. Kummankin osan jätevedet ohjataan lämmöntalteenottojärjestelmän kautta kunnalliseen viemäriin. Järjestelmällä pyritään jäähdyttämään jätevesi rakennukseen tulevan kylmän veden lämpötilaan ja siten hyödyntämään kaikki käyttöveden lämpöenergia, jota kiinteistössä käytetään.

Tätä jätevedestä tulevaa lämpöä johdetaan takaisin lämpimään käyttöveteen sekä lattialämmityspiiriin, joten kaukolämpöä tarvitaan vähemmän lämmittämiseen. Tässä työssä ei keskitytä lämmöntalteenottojärjestelmän syvälliseen analysointiin, vaan pyritään yleisluontoisempaan tarkasteluun asetusten, määräysten ja fysikaalisten ilmiöiden kautta.

2 Määräykset

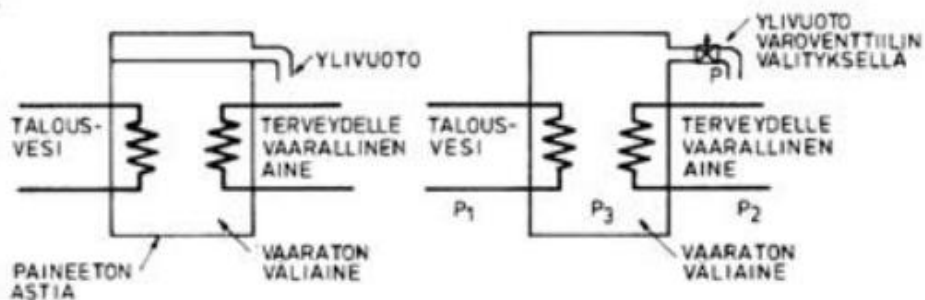
2.1 Suomen rakentamismääräyskokoelma

Suomen rakentamismääräyskokoelman määräykset ovat perinteisesti koskeneet uuden rakennuksen rakentamista. Rakennuksen korjaus- ja muutostyössä määräyksiä on sovellettu vain siltä osin kuin toimenpiteen laatu ja laajuus sekä rakennuksen tai sen osan mahdollisesti muutettavat käytötavat ovat edellyttäneet (ellei määräyksissä ole nimenomaisesti määrätty toisin). Rakentamista koskevien määräysten soveltaminen on tarkoitettu joustavaksi siten kuin se rakennuksen ominaisuudet ja erityispiirteet huomioon ottaen on mahdollista. Sitä mukaan kuin rakentamismääräyskokoelman osia uudistetaan, kustakin uudesta asetuksesta käy suoraan ilmi, koskeeko se uuden rakennuksen rakentamista vai rakennuksen korjausta tai muutostyötä. Rakentamismääräyskokoelma antaa hyvän lähtökohdan ja toteutuksen suunnittelulle. [1.]

Rakentamista koskevat asetukset uudistettiin vuoteen 2018 mennessä vuonna 2013 voimaan tulleen maankäyttö- ja rakennuslain muutoksen (958/2012) mukaisesti. Uudistuksen keskeisenä tavoitteena on rakentamista koskevan sääntelyn selkeys sekä sen soveltamisen yhtenäisyys ja ennakoitavuus. Uudistuksen yhteydessä sääntelyä myös vähennettiin. [1.]

Ympäristöministeriön asetuksen 1047/2017 3 § mukaan pääsuunnittelijan, erityissuunnittelijan ja rakennussuunnittelijan on tehtävänsä mukaisesti huolehdittava rakennuksen suunnittelussa siitä, että rakennus täyttää käyttötarkoituksen mukaisesti vesi- ja viemärilaitteistojen turvallisuuteen, terveellisyyteen, käyttövarmuuteen, kestävyyteen ja energiatehokkuuteen vaikuttavat vaatimukset. Suunnitelmasta on käytävä ilmi vesi- ja viemärilaitteistoissa käytettävät osat, tuotteet ja materiaalit. [2.] Jäteveden lämmöntalteenottojärjestelmä tulee tehdä sellaiseksi, että se ei ole missään tekemisissä tai kosketuksissa talousveden kanssa. Tällä tavalla varmistetaan se, että käyttäjälle tehdään turvallinen tekninen järjestelmä.

Suljetun järjestelmän suunnittelussa tulee myös varautua lämpölaajenemiseen varoventtiilin avulla. Silloin ei tule mitään ongelmia tai sisäistä vaurioitumisriskiä jäteveden kanssa. Suunnitelman kojelueetelosta on hyvä ilmetä, mitä osia ja komponentteja järjestelmässä on. Se helpottaa jokaista suunnittelijaa jäteveden lämmöntalteenottojärjestelmän toteuttamisessa.



Varoventtiilin avautumispaine p valitaan siten, että vuoto kierukassa huomataan ($p_3 < p < p_1$ tai p_2).

Vuoto kierukassa huomataan ylivuodosta. Ylivuoto varustetaan hälytyksellä.

Kuva 1. Esimerkkejä järjestelyistä, joilla voidaan varmistaa, että terveydellisesti vaarallisia aineita ei pääse talousveteen ja vesilaitteistoon [3, s. 8].

Aiemman Suomen rakentamismääräyskokoelman osan D1 luvun 2.3.3 mukaan vesilaitteisto on tehtävä sellaiseksi, että veden kanssa kosketukseen joutuvista materiaaleista ei irtoa tai liukene veteen haitallisessa määrin terveydelle haitallisia tai vaarallisia aineita. Veden tulee säilyttää laatuvaatimukset jatkuvasti. Vesilaitteiston materiaaleina on käytettävä käyttötarkoitukseen sopivia, laadultaan testattuja ja tarkastettuja materiaaleja. [3, s. 7.] Kuvassa 1 on havainnollistettu, kuinka jäteveden lämmöntalteenotto tulee teknisesti rakentaa.

2.2 Euroopan unioni

Ilmastomuutoksen vuoksi Euroopassa on viime aikoina pyritty tekemään projekteja, joiden avulla tutkitaan, miten lämpöenergiaa voidaan hyödyntää ja ottaa talteen nykyistä enemmän. Näihin projekteihin on investoitu paljon aikaa ja varoja. Kun uusia energiatehokkaita järjestelmiä otetaan käyttöön, hiilijalanjälki pienenee ja kasvihuonekaasujen päästöt vähenevät rakennuksen elinkaaren aikana. Yksi direktiivi, jolle Eurooppa on antanut oman hyväksyntänsä ja asettanut jäteveden lämmöntalteenoton uusiutuvaksi energianlähteeksi, tunnetaan nimellä RED II. Tämä päätös tulee siitä, että jätevesien lämmöntalteenotosta on tulossa yhä suosittu energialähde taloihin, kerrostaloihin, hotelleihin ja uima-altaisiin. Vuodesta 2019 lähtien yhteensä 25 suunnittelutoimistoa on Euroopassa suunnitellut jätevesien lämmöntalteenottolaitteita taloihin ja huoneistoihin, mikä on 50 % enemmän kuin vuonna 2016 [4]. Kuvasta 2 nähdään EU:n päätös, jonka kannessa on lämpökameralla otettu kuva jätevesiviemäristä.



Kuva 2. Lämpökamerakuva jätevesiputkistosta EU:n kansilehdellä [4].

EU-jäsenmaiden tulee muuttaa lainsäädäntönsä RED II:n mukaiseksi 30.6.2021 mennessä. Uudessa RED II -direktiivissä ei enää aseteta jäsenmaille maakohtaisia tavoitteita, vaan jäsenmaat varmistavat yhteisesti, että 32 % tuotetaan uusiutuvilla energianlähteillä vuoteen 2030 mennessä. Suomi kuuluu kategoriaan, jossa tavoite uusiutuvan energian lisäystarpeesta on vuosittain vähintään 0,55 % vuodesta 2021 vuoteen 2030 asti. Tämä koskee myös teollisuuden lämmitystä ja jäähdytystä. [5.]

RED II -direktiivi muuttaa joiltain osin uusiutuvan energian lisäämiseen käytettävää keinovalikoimaa. Uusien tukijärjestelmien määrittelyyn tulee muutoksia, koska tavoitteena on ollut lisätä tukiohjelmien markkinaehtoisuutta sekä edellyttää teknologianeutraaliutta tarjouskilpailuun perustuvilta tukiohjelmilta. Uusiutuvan energian hankkeiden lupamenettelyt uudistuvat siten, että jäsenvaltioiden tulee perustaa lupamenettelyjen yhteispisteitä, joista uusiutuvan energian tuottaja voi saada kaikki perustamiseen tarvittavat luvat (ns. yhden luukun periaate). Yhteispisteen kautta hakija voi siis hakea esimerkiksi energialaitoksen rakennuslupaa tai neuvotella verkkoon liittymisestä. Lupamenettelyiden kestolle on asetettu aikarajat. Suurilla laitoksilla (150 kW tai yli) lupamenettelyn enimmäiskesto on kaksi vuotta ja pienillä laitoksilla (alle 150 kW) yksi vuosi. Poikkeuksellisissa olosuhteissa lupakäsittelyä voidaan pidentää vuodella. [5.]

Uuden direktiivin toimeenpanon valmistelu on vasta käynnistymässä, joten energiavirastolle tulevat tehtävät ovat vielä selkiytymättä. Tehtävien määrä ja luonne riippuvat pääosin tulevasta lainsäädännöstä. Mahdolliset lainsäädännön muutokset valmistellaan TEM:n johtamissa työryhmissä. Lisäksi työ- ja elinkeinoministeriö teettää selvityksiä direktiivin toimeenpanoon liittyvistä lainsäädäntötarpeista. [5.]

2.3 KytKentä kaukolämpöön

2.3.1 Rakennuksen kaukolämmityksen määräykset ja ohjeet

Energiateollisuuden kaukolämmitystä koskevan julkaisun K1/2013 luvun 4.2.1 mukaan käyttöveden mitoitusvirtaamana käytetään RakMK osan D1 "Kiinteistöjen vesi- ja viemärilaitteistot" lämpimän käyttöveden jakojohdon mitoitusvirtaamaa. Lämmönsiirtimen teho mitoitetaan siten, että siitä saatavan käyttöveden lämpötila mitoitusvirtaamalla on 58 °C.

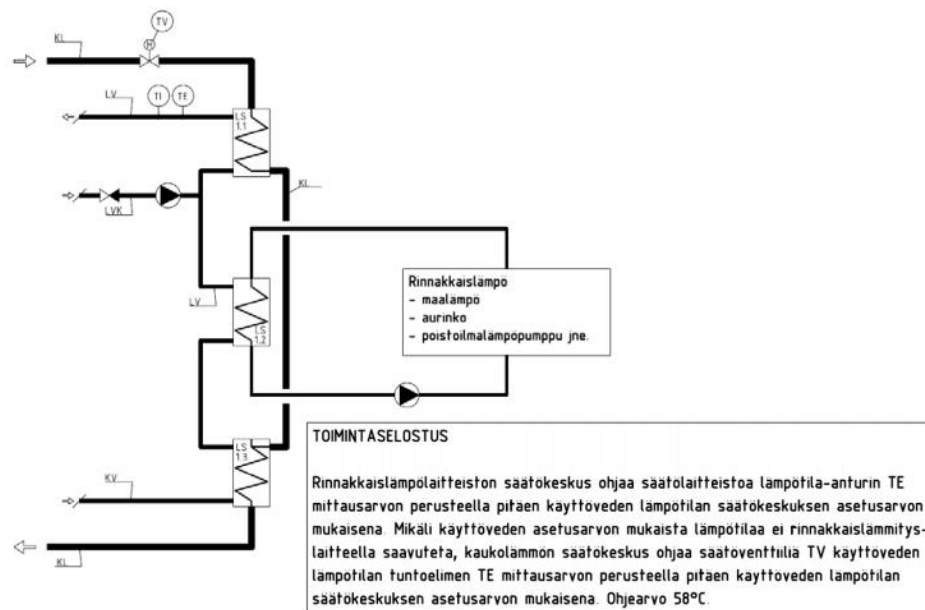
Lämminvesilaitteisto (ml. lämpimän käyttöveden kiertojohto) suunnitellaan siten, että veden lämpötila on siinä vähintään 55 °C. Käyttöveden mitoitusvirtaama on vähintään 0,3 dm³/s, joka vastaa lämmönsiirtimen lämpötehoa 60 kW. [6, s. 12.]

Kaukolämmityksen ohjeilla käyttövesi pyritään pitämään käyttöveden mitoituslämpötilassa, jotta ei synny riskiä Legionella-bakteerin esiintymisestä käyttövesiverkostossa. Käyttövesi voidaan lämmittää turvallisen lämpimäksi lämpöpumpuilla, tarvittaessa sähkövastuksen, kaukolämmön tai muun lämmönkehittimen avustuksella. [7.]

Taulukko 1. Käyttöveden lämmönsiirtimien mitoituslämpötilat [6, s. 82].

	LÄMMÖNSIIRTIMIEN MITOITUSLÄMPÖTILAT °C			
	ENSIÖ		TOISIO	
	TULO	PALUU	KYLMÄ VESI	LÄMMIN VESI
Käyttöveden lämmönsiirtimet	70	20 (max)	10	58

Periaatteellisissa kytkentämalleissa on esitetty vaihtoehdot kiinteistön oman lämmönlähteen kytkemisestä lämmitysverkkoon ja käyttöveden lämmittämiseen. Kytkentämallit on laadittu siten, että kaukolämpöveden jäähtymä ei huonone tarpeettomasti. Mukavuuslattialämmitys on lämpötilatasoltaan sopiva käyttökohde useimmille rinnakkaislämmönlähteille. Varaajan tarvetta tulee tarkastella erityisesti silloin, kun rinnakkaislämmönlähteenä on aurinko. Myös muissa tapauksissa varaaja voi lisätä toimintavarmuutta ja tehostaa rinnakkaisen lämmönlähteen hyödyntämistä [6, s. 82]. Taulukosta 1 nähdään, että kaukolämpöveden tulisi LV-lämmönsiirtimisessä jäähtyä mitoitusilanteessa 20 °C:seen. Lämmönjakokeskuksissa pyritään hyvään kaukolämpöveden jäähtymään, jotta sähkön tuotannon hyötysuhde CHP-voimalaitoksella pysyy hyvänä, kaukolämmön pumpausenergian tarve ei kasva kohtuuttomasti ja kaukolämmön paluuputken lämpöhäviöt ovat pienet.



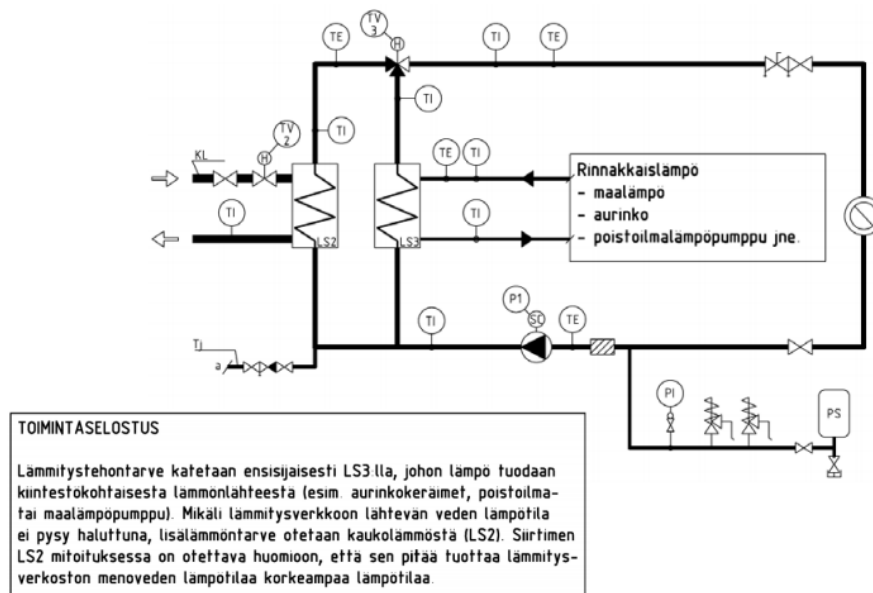
Kuva 3. Rinnakkaislämmön kytkentä käyttöveden lämmitykseen [6, s. 89].

Jäähtymällä tarkoitetaan kaukolämmön meno- ja paluuveden välistä lämpötilaeroa. Asiakkaan kaukolämpösiirtimen läpi virtaava vesi jäähtyy siirtimellä luovuttaessaan lämmön kiinteistön verkon veteen. Kesäaikana hyvä jäähtymä on 15–30 °C. Silloin lämpöä tarvitaan vain käyttöveden lämmittämiseen, jolloin lämpötilaero on pienimmillään. Talvipakkasilla jäähtymä voi olla 50–70 °C, hetkittäin jopa 80 °C riippuen rakennuksen talotekniikasta [8]. Kuvasta 3 nähdään, mihin TE anturi tulisi sijoittaa. Siten ohjataan käyttöveden lämpötilatasoa, joka ei saa alittaa 58 °C. Tämä tulee ottaa huomioon automaattisuunnitelmissa kytkentäkaaviota tehdessä. Kesäkaudella suurin osa lämmityksestä menee käyttöveteen. Talvikaudella lattialämmitys tulee mukaan. Siten lämmityksen tarve kasvaa rakennuksessa. Kuvasta 4 nähdään, kuinka lattialämmityspiiri tulee tehdä oman kolmitieventtiilin ja lämmönsiirtimen kanssa.

Taulukko 2. Lämmityksen ja ilmanvaihdon lämmönsiirtimien mitoituslämpötilat mitoitusulko-
lämpötilassa – uudisrakennukset [6, s. 8].

	LÄMMÖNSIIRTIMIEN MITOITUSLÄMPÖTILAT °C			
	ENSIÖ		TOISIO	
	TULO	PALUU	PALUU	MENO
Lämmityksen lämmönsiirtimet, radiaattori-lämmitys - suositus	115	33 (max)	30 (max)	45 (max)
Lämmityksen lämmönsiirtimet, radiaattori-lämmitys - poikkeustapaukset	115	33 (max)	30 (max)	60 (max)
Lämmityksen lämmönsiirtimet, lattialämmitys	115	33 (max)	30 (max)	35 (max)
Kosteiden tilojen mukavuuslattialämmitys	70	28 (max)	25 (max)	30 (max)
Ilmanvaihdon lämmönsiirtimet	115	33 (max)	30 (max)	60 (max)
Huomautus		Ensiöpuolen paluulämpötila saa olla enintään 3 °C korkeampi kuin toisiopuolen paluulämpötila		

Lämmönsiirtimet mitoitetaan suurimman esiintyvän lämmitystehotarpeen mukaisilla lämpötiloilla. Jaksottaisen lämmityksen yhteydessä seisontajakson jälkeinen tehohuippu on ilmoitettava todellisena mitoitustehona. Suunnitelmissa on lisäksi esitettävä lämmönsiirtimeen toiminnan tarkastelu siinä käyttötilanteessa, jossa lämmönsiirtimeen virtaamat ovat suurimmat [6, s.12]. Taulukosta 2 nähdään, kuinka lattialämmityksen mitoituslämpötilat ovat ensiöpuolella 115/33 °C ja toisiopuolella 35/30 °C. Näillä periaatteilla sekä kuvien 3 ja 4 mukaisilla kytkennöillä voidaan selvittää, kuinka paljon lämpöenergiaa lämpöpumppu pystyy tuottamaan vuoden aikana lattialämmitykseen ja käyttöveteen, ottaen huomioon se, että kaukolämpövesi jäähtyy riittävästi.



Kuva 4. Rinnakkaislämmön kytkentä tilojen lämmitykseen [6, s. 89].

Lämmityspiirit, joilla on erilaiset mitoitus- tai toimintalämpötilat tai käyttöajat, toteutetaan omilla erillisillä lämmönsiirtimillä ja säätöautomaattilla. Rinnakkaislämmönsiirrin ja kaukolämmönsiirrin kytketään lattialämmityspiiriin. Piirin menoveden lämpötilaa säädetään kolmitieventtiilillä. Ensiopuolen virtaamat lasketaan ja ilmoitetaan lämmönsiirtimen todellisen jäähtymän mukaisesti. Jos toisiopuolella käytetään lämmönsiirtonesteenä muuta kuin vettä, esimerkiksi glykoli-vesiliuosta, liuoksen ominaisuudet lämmönsiirrossa otetaan huomioon lämmönsiirtimen mitoituksessa. Liuoksen seossuhteet ja ominaisuudet ilmoitetaan suunnitelmassa [6, s. 12]. Lämpöpumpun höyrystimen kautta kierrätetään yleensä vesiglykoli- tai vesietanoliliuosta. Tällä varmistetaan, että putkistossa oleva neste ei jäädy. Liuoksen käyttö myös mahdollistaa jäteveden jäähdyttämisen matalampana lämpötilaan talteenottolaitteessa. Tämä tulee huomioida suunnitelmissa, kuten ohjeistuksessa sanotaan.

2.3.2 Helenin ohje hybridikytkennästä kaukolämpölaitteiston rinnalle

Tässä käsitellään Helsingin energian eli Helenin ohjetta hybridikytkennästä kaukolämpölaitteiston rinnalle. Energialaitos ohjeistaa, että heti hankesuunnittelun alkuvaiheessa on hyvä ottaa yhteyttä Heleniin, jotta se voi luoda kiinteistölle soveltuvan hyvän ratkaisun energiansäästöä ajatellen. Suunniteltavan kohteen piirustukset tulee lähettää Helenin

tekniseen palveluun ennakkotarkastukseen hyvissä ajoin ennen laitehankintaa ja asennusta. [9.] Kun noudattaa tätä ohjetta alusta pitäen, on huomattavasti helpompaa puuttua mahdollisiin ongelmatilanteisiin ja ottaa huomioon Helenin kanta.

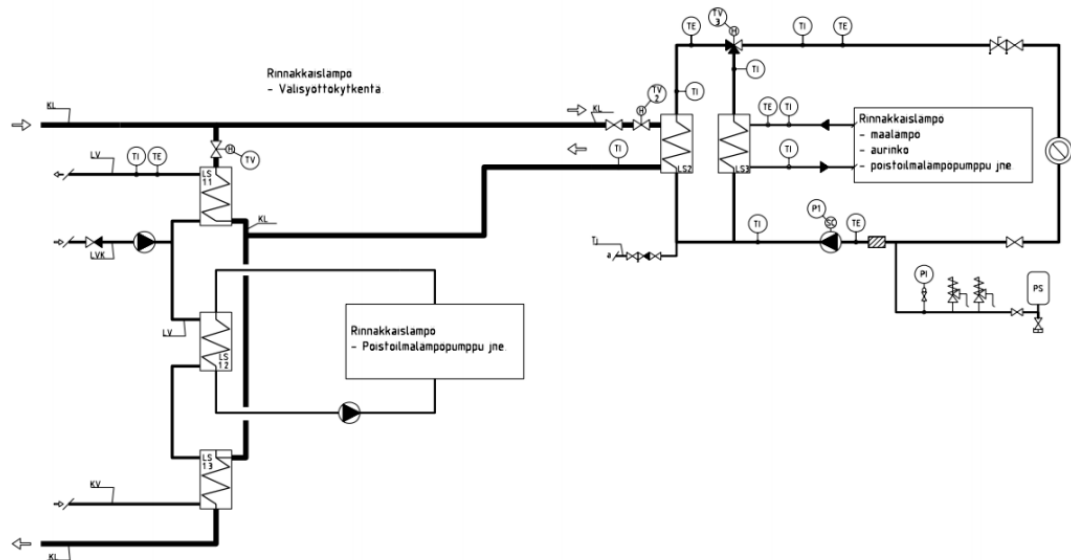
Laitteiston suunnittelussa on noudatettava seuraavia ohjeita ja määräyksiä:

- Rakennusten kaukolämmitys Määräykset ja ohjeet K1/2013
- Kaukolämmön suunnittelu- ja urakointiohjeita Helen 1/2015
- Suomen rakentamismääräyskokoelma osa D1
- Sosiaali- ja terveysministeriön opas 2003:1 Asumisterveysohje.

Kuvan 5 mukaisesti lämpimän käyttöveden kaukolämpösiirtimet (LS 1.1 ja LS 1.3) mitoitetaan lämpimän käyttöveden mitoitusvirtaaman mukaiselle täydelle teholle. Lämmönsiirtimet mitoitetaan tehojen suhteessa siten, että LS 1.1 mitoitetaan 50 %:n teholla ja LS 1.3 50 %:n teholla. Mitoituksessa on myös huomioitava lämmityssiirtimeltä LS 2 lämmönsiirtimeen LS 1.3 välisyöttöön tulevan kaukolämpöveden hyödyntäminen käyttöveden esilämmityksessä. Siirtimeen LS 1.3 tulee jäähdyttää kaukolämpövesi 20 °C:seen kaikissa käyttötilanteissa käyttöveden mitoitusvirtaamalla kylmän veden ollessa 10 °C [9]. Helenin ohje kaukolämpöveden jäähtymään on selkeä, kaukolämpöveden tulee aina jäähtyä riittävästi. Tähän kiinnitettiin huomiota K1/2013 mukaisesti ja samoin Helenin ohjeessa. Kuvasta 5 nähdään kokonaiskuva sekä käyttöveden että lattialämmityspiirin ohjeen mukaisesta kytkennästä.

Isoissa kiinteistöissä kuormituksen vaihtelun tapauksissa lämmönsiirtimet varustetaan kahdella säätöventtiilillä. Kytkentä ja säätölaitteisto tulee tehdä niin, että säätö toimii julkaisun K1/2013 vaatimusten mukaisesti. Lämpimän käyttöveden lämmityslaitteistossa rinnakkaislämmönsiirrin ei saa olla käyttöveden esilämmitysosana, vaan sen tulee sijaita käyttöveden virtaussuunnassa esilämmityssiirtimeen LS 1.3 jälkeen ja ennen jälkilämmityssiirrintä LS 1.1. [9.]

KytKentäesimerkki



Kuva 5. Helenin kytKentäesimerkki kaukolämpölaitteiston rinnalle [9].

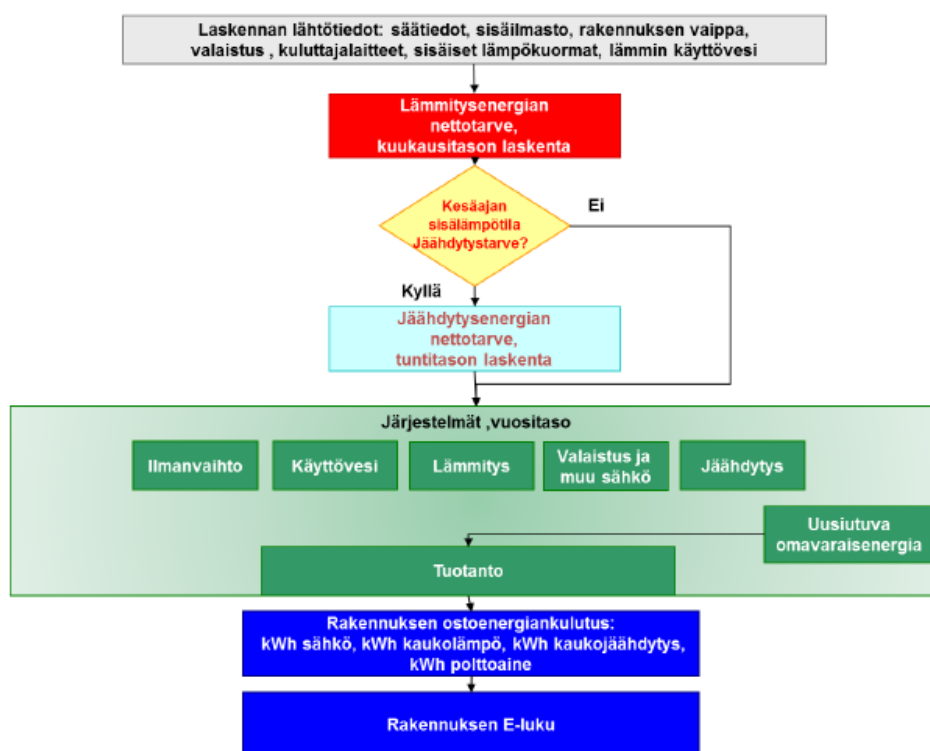
Myös lämmitysverkoston lämmönsiirrin mitoitetaan kiinteistön tarvitsemalle täydelle lämmitysteholle. Ympäristöministeriön asetuksessa 4/13 rakennusten energiatehokkuuden parantamisesta korjaus- ja muutostöissä määritetään kiinteistön päälämmitysmuodoksi se lämmitysmuoto, joka kattaa kiinteistön tarvitseman lämmitystehon kokonaan (100 %). Kaukolämpö tulee tästä syystä mitoittaa toimintavarmuuden takia mitoitusukolämpötilaa $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$ vastaavalle täydelle mitoistusteholle. [9.]

3 Rakennuksen energiakulutukset

3.1 Taseraja ja energian tarve

Rakennuksen energiankulutuksen laskennan vaiheet on esitetty kuvassa 6. Energiategokkuuden vertailulukua laskettaessa käytettävät energiankulutuksen taserajat esitetään kuvassa 7. Rakennuksen energiantarve koostuu tilojen ja ilmanvaihdon lämmitystarpeesta, käyttöveden lämmitystarpeesta, tilojen ja ilmanvaihdon jäähdytystarpeesta sekä valaistuksen ja kuluttajalaitteiden sähköenergiantarpeesta. Lämmitysenergian net-

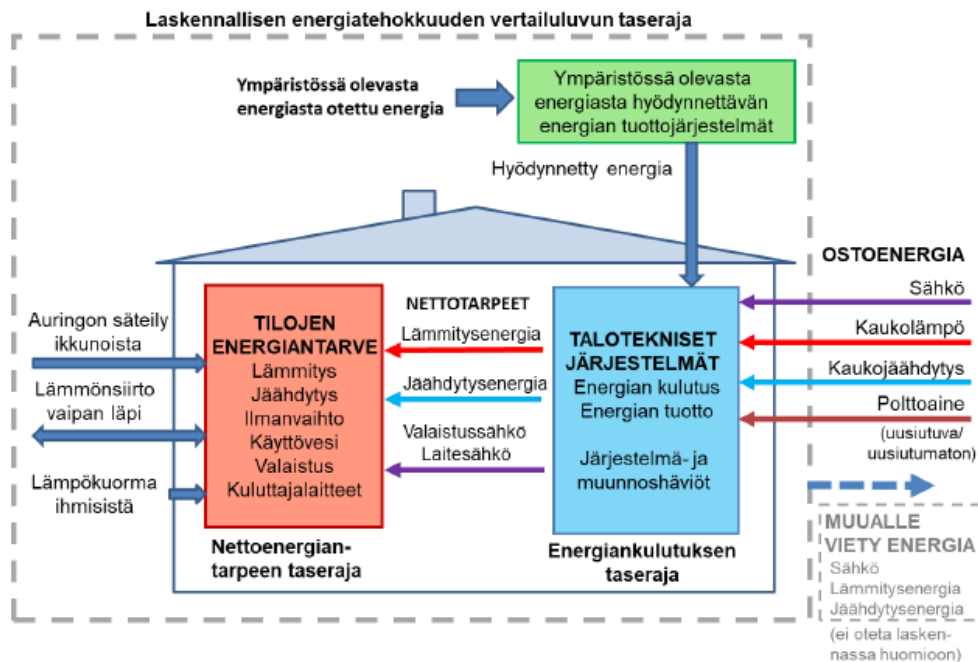
totarve saadaan lämmitysenergian tarpeen sekä rakennukseen tulevan auringon säteilyn, poistoilmasta talteen otetun energian ja sisäisten lämpökuormien erotuksena. Lämmitysenergian nettotarvetta vastaava energia tuodaan lämmitysjärjestelmällä tiloihin, tuloilmaan ja käyttöveteen. Jäähdytysenergian nettotarvetta vastaava energia tuodaan jäähdytysjärjestelmällä tiloihin ja tuloilmaan lämpöä poistamalla [10, s. 14]. Nykyään on hyviä mallinnusohjelmia helpottamaan rakennuksen energiankulutuksen laskentaa, esimerkiksi IDA ICE. [32.]



Kuva 6. Rakennuksen energiankulutuksen laskennan vaiheet [10, s. 14].

Lämmitysjärjestelmän energiankulutus lasketaan lämmitysenergian nettotarpeesta ottamalla huomioon järjestelmähäviöt, jotka muodostuvat lämmitysenergian luovutuksen, jakelun ja varastoinnin häviöistä, sekä ottamalla huomioon hyötysuhteet ja ympäristössä olevasta energiasta lämmitysjärjestelmään tuotettu energia. Lämmitysjärjestelmän energia eritellään sähkö- ja lämpöenergian osalta. [10, s. 14.]

Tässä kohteessa ei ole ollenkaan jäähdytystä, mutta esimerkiksi Helenin yhden skenaarion mukaan jäähdytystarve tulee nousemaan seuraavan 80 vuoden aikana huomattavasti, jopa 75 % Suomessa, joten tähän on syytä kiinnittää huomiota. Kuvasta 7 nähdään rakennuksen taseraja ja taseen osatekijät.



Kuva 7. Laskennallisen energiatehokkuuden vertailuluvun taseraja ja sen muodostuminen [10, s. 15].

Ostoenergiana tutkimuskohteessa käytetään kaukolämpöä. Kaukolämmön hinta on energialaitos Helenin mukaan noin 6,33 snt/kWh [11]. Kesän ja talven aikana hinta vaihtelee. Talvella energiantarpeen ollessa suurta kaukolämmön hinta on korkeampi kuin kesällä pienen lämmöntarpeen aikaan. Nykyään kerrostaloissa päädytään lämmitysratkaisuihin lähes aina kaukolämpöön, ja se onkin suosittu erityisesti kaupunkien ja taajamien lämmitysmuotona. [12.]

3.2 Hyötysuhteet

Kun rakennukselle lasketaan energiankulutusta ja lämmitystehotarvetta, käytetään vuosihyötysuhteita tarkentamaan laskentoja. Kuten taulukosta 3 voidaan havaita, kaukolämmöllä päästään todella hyvään vuosihyötysuhteeseen 97 %. Tämä on yksi syistä, joiden vuoksi kaukolämpöä mielellään käytetään rakennuksissa. Sen lisäksi edullinen hinta ja lämmityksen varmuus vaikuttavat kaukolämmön suosimiseen. Lämmintä vettä on aina saatavilla tarpeiden mukaan ja lämmitysverkoston menoveden lämpötila pysyy riittävänä kaikilla ulkolämpötiloilla.

Taulukko 3. Isompien rakennusten kattiloiden, lämmönjakokeskusten hyötysuhteiden ja sähkönkulutuksen ohjearvoja [10, s. 49].

	Vuosihyötysuhde	Sähkö kWh/a m ²
	η_{tuotto}	ϵ_{tuotto}
Öljy/kaasu, standardikattila	0,90	0,24 ¹⁾ 0,11 ²⁾
Öljy, kondenssikattila ³⁾	0,95	0,25
Kaasu, kondenssikattila ³⁾	1,01	0,12
Pellettikattila	0,84	0,13
Puukattila energiavaraajalla	0,82	0,25
Kaukolämpö	0,97	0,07
Huonekohtainen sähkölämmitys	1,00	0,00

¹⁾ öljy

²⁾ kaasu

³⁾ hyötysuhde alemman lämpöarvon mukaan

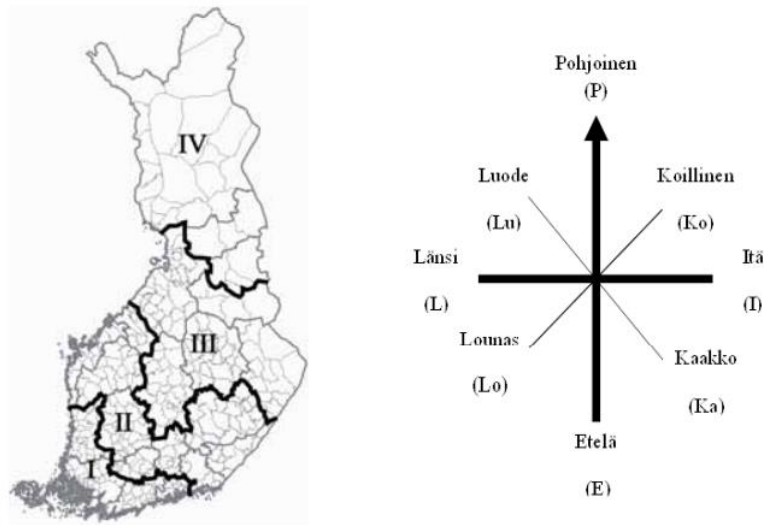
Taulukossa 4 on esitetty lämmönjaon ja -luovutuksen hyötysuhteen ohjearvoja. Taulukon hyötysuhteissa on otettu huomioon lämmönjaon ja -luovutuksen häviöt sekä järjestelmän säädön ja lämpötilakerrostuman vaikutus. Hyötysuhteet on määritetty suhdetasäätimellä (P = 2 °C) lukuun ottamatta sähköpatterilämmitystä sekä sähköistä katto-, lattia- ja ikkunalämmitystä, jotka on määritetty elektronisella säätimellä. [10, s. 40.]

Taulukko 4. Lämmitysjärjestelmien lämmönjaon ja -luovutuksen vuosihyötysuhteiden ja apulaitteiden ominaissähkökäytön ohjearvoja [10, s. 41].

Lämmitysratkaisu	Vuosihyötysuhde $\eta_{\text{lämmitys, tilat}}$ -	Sähkö e_{tilat} kWh/(m ² a)
Vesiradiaattori 45/35 °C		
jakojohtot eristetty	0,90	2
jakojohtot eristämätön	0,85	2
Vesiradiaattori 70/40 °C		
jakojohtot eristetty	0,9	2
jakojohtot eristämätön	0,8	2
Vesiradiaattori 70/40 °C jakotukilla		
	0,80	2
Vesiradiaattori 45/35 °C jakotukilla		
	0,85	2
Vesikiertoinen lattialämmitys 40/30 °C		
maata vasten rajoittuvassa rak.	0,8	2,5
ryömintatilaan rajoittuvassa rak.	0,8	2,5
ulkoilmaan rajoittuvassa rak.	0,75	2,5
lämpimään tilaan rajoittuvassa rak.	0,85	2,5

Mikäli vesikiertoisten järjestelmien mitoituslämpötilat poikkeavat taulukoiduista arvoista, niiden hyötysuhteet voidaan arvioida interpoloimalla taulukkoarvojen perusteella. Sähköisten lämmitysjärjestelmien apulaitteiden ominaiskulutukset perustuvat säätölaitteiden sähkönkäyttöön [10, s. 40]. Tutkimuskohteeseen on tulossa vesikiertoinen lattialämmitys lämpimään tilaan rajoittuvassa rakennuksessa, joten lattialämmityksen vuosihyötysuhteeksi on määritelty 85 %.

3.3 Energiatehokkuus



Kuva 8. Säävyöhykkeet ja ilmansuuntien lyhenteet [13, s. 17].

Kuvassa 8 ja taulukossa 5 esitetään lämmitystehon laskennassa käytettäviä ohjearvoja. Tuntikohtaiset säätiedot ovat saatavissa ympäristöministeriön verkkosivuilta. Lämmitystehontarpeen laskenta tehdään rakennuspaikan maantieteellisen sijainnin mukaisella säävyöhykkeen mitoittavalla ulkolämpötilalla. [13, s. 17.]

Taulukko 5. Mitoittavat ulkoilman lämpötilat eri säävyöhykkeillä [13, s. 17].

Säävyöhyke	Mitoittava ulkoilman lämpötila, °C
I	-26
II	-29
III	-32
IV	-38

Laskennallinen energiatehokkuuden vertailuluku (E-luku), jonka yksikkönä on kWh_E/(m²a), on energiamuotojen kertoimilla painotettu rakennuksen laskennallinen osastoenergiankulutus rakennuksen lämmitettyä nettoalaa kohden vuodessa. Rakennuksen käyttötarkoitukseluokan mukaisesti laskettu E-luku ei saa ylittää taulukossa 6 esitettyjä raja-arvoja. [13, s. 3.]

Taulukko 6. Laskennallisen energiatehokkuuden vertailuluvun vaatimustasot käyttötarkoitukseluokittain vertailuarvona [13, s. 3].

Käyttötarkoitukseluokka	E-luvun raja-arvo kWh _E /(m ² a)
Luokka 1) Pienet asuinrakennukset: a) Erillinen pientalo ja ketjutalon osana oleva rakennus, joiden lämmitetty nettoala (A_{netto}) on 50–150 m ² b) Erillinen pientalo ja ketjutalon osana oleva rakennus, joiden lämmitetty nettoala (A_{netto}) on enemmän kuin 150 m ² kuitenkin enintään 600 m ² c) Erillinen pientalo ja ketjutalon osana oleva rakennus, joiden lämmitetty nettoala (A_{netto}) on enemmän kuin 600 m ² d) Rivitalo ja asuinkerrostalo, jossa on asuinkerroksia enintään kahdessa kerroksessa	200–0,6 A_{netto} 116–0,04 A_{netto} 92 105
Luokka 2) Asuinkerrostalo, jossa on asuinkerroksia vähintään kolmessa kerroksessa	90
Luokka 3) Toimistorakennus, terveyskeskus	100
Luokka 4) Liikerakennus, tavaratalo, kauppakeskus, myymälärakennus lukuun ottamatta päivittäistavarakaupan alle 2000 m ² yksikköä, myymälähalli, teatteri, ooppera-, konsertti- ja kongressitalo, elokuvateatteri, kirjasto, arkisto, museo, taidegalleria, näyttelyhalli	135
Luokka 5) Majoitusliikerakennus, hotelli, asuntola, palvelutalo, vanhainkoti, hoitolaitos	160
Luokka 6) Opetusrakennus ja päiväkot	100

Ympäristöministeriön asetuksen 1048/2017 mukaan rakennuksen ja rakennuksen osan E-luku lasketaan kuukausitason laskentamenetelmällä tai dynaamisella laskentamenetelmällä. Energiatehokkuusluokkaa kuvataan tunnuksilla A–G, kevennetyn menettelyn mukaan laaditussa energiatodistuksessa energiatehokkuusluokkaa kuvataan tunnuksella H. Rakennukset jaetaan niiden käyttötarkoituksen mukaisesti ryhmiin, joilla on kullakin oma luokitteluasteikkonsa [14]. Käytännössä nykyään pyritään A-luokkaan uudis-kerrostaloissa ja jäteveden lämmöntalteenottojärjestelmä on apuna tässä.

Uudisrakennuksen energiatodistus tulee esittää, kun haetaan rakennuslupaa. Todistuksella osoitetaan rakennuksen arvioitu energiatehokkuus. Todistus on korvattava täydennetyllä tai tarkennetulla todistuksella ennen rakennuksen käyttöönottoa, jos todistus on lupavaiheessa puutteellinen tai tiedot tarkentuvat hankkeen edetessä. Rakennus katsotaan otetuksi käyttöön, kun se on hyväksytty käyttöönotettavaksi loppukatselmuksessa. [15, s. 8]. Työssä tarkastellaan, kuinka paljon jäteveden lämmöntalteenotto vaikuttaa E-lukuun ja parantaa rakennuksen elinkaarikustannuksia. Taulukosta 6 voidaan havaita, että asuinkerrostalo kuuluu luokkaan 2.

E-luku lasketaan energiamuodoittain eritellystä rakennuksen laskennallisesta ostoenergiankulutuksesta energiamuotojen kertoimia käyttäen kaavalla 1. [13, s. 4.]

$$E = \frac{f_{\text{kaukolämpö}} Q_{\text{kaukolämpö}} + f_{\text{kaukojäähdytys}} Q_{\text{kaukojäähdytys}} + f_{\text{polttoaine}} Q_{\text{polttoaine}} + f_{\text{säh}} W_{\text{säh}}}{A_{\text{netto}}} \quad (1)$$

E	on energiatehokkuuden vertailuluku, kWh _E /(m ² a)
Q _{kaukolämpö}	on kaukolämmön kulutus vuodessa, kWh/a
Q _{kaukojäähdytys}	on kaukojäähdytyksen kulutus vuodessa, kWh/a
Q _{polttoaine}	on polttoaineen sisältämän energian kulutus vuodessa, kWh/a
W _{säh}	on sähkön kulutus vuodessa, kWh/a
f _{kaukolämpö}	on kaukolämmön energiamuodon kerroin
f _{kaukojäähdytys}	on kaukojäähdytyksen energiamuodon kerroin
f _{polttoaine}	on polttoaineen energiamuodon kerroin
f _{säh}	on sähkön energiamuodon kerroin
A _{netto}	on rakennuksen lämmitetty nettoala, m ²

Lämpimän käyttöveden vakioidun käytön lämmitysenergian nettotarpeena on käytettävä seuraavia käyttötarkoituksiluokittaisia lämmitysenergian nettotarpeita rakennuksen lämmitettyä nettoalaa kohden. [13, s. 8.]

Taulukko 7. Lämpimän käyttöveden vakioidut käyttöarvot [13, s. 8].

Käyttötarkoitukseluokka	Lämpimän käyttöveden lämmitysenergian nettotarve vuodessa kWh/(m ² a)
Luokka 1)	35
Luokka 2)	35
Luokka 3)	6
Luokka 4)	4
Luokka 5)	40
Luokka 6)	11
Luokka 7)	20
Luokka 8)	30

Luokassa 1 on lämpimän käyttöveden lämmitysenergian nettotarve kuitenkin enintään 4200 kWh vuodessa asuntoa kohden. Lämpimän käyttöveden lämmitysenergian nettotarpeena voi laskennassa käyttää 15 % edellä mainittuja pienempiä arvoja, jos raken-

nuksen käyttövesiverkosto varustetaan vakiopaineventtiilillä tai muulla vastaavalla painetasoa säätävällä tekniikalla [13, s. 8]. Taulukosta 7 nähdään, että asuinkerrostaloissa tulee käyttää lämpimän käyttöveden nettotarpeena 35 kWh/(m²a) käyttötarkoituksenluokan 2 mukaisesti.

4 Lämmönsiirtyminen ja lämpöpumput

4.1 Lämmönsiirtyminen

Lämpö on aineen molekyylien liike-energiaa, joka kasvaa lämpötilan noustessa. Kaasuissa molekyylit liikkuvat ja törmäävät toisiin molekyyleihin. Lämpötilan kohotessa molekyylien nopeudet kasvavat. Nesteissä molekyylien liike on rajoitetumpaa kuin kaasuissa, mutta myös lämpötilasta riippuvaa. Kiinteissä aineissa lämpö on atomien ja molekyylien värähtelyä, joka siirtyy aaltoliikkeenä ja johteissa lisäksi vapaiden elektronien liikkeenä. Lämpö siirtyy aina korkeammasta lämpötilasta matalampaan. Faasimuutoksissa, kuten kiinteän aineen sulaminen ja nesteen höyrystyminen, energiaa tarvitaan vapauttamaan molekyylien väliset sidosvoimat. Lämpömäärä eli lämpöenergia ilmaisee tarkastelun kohteena olevan kappaleen kaikkien molekyylien liike-energian summan. Lämpöenergia riippuu siis kappaleen massasta. [16.]

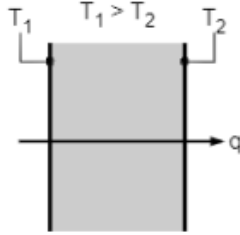
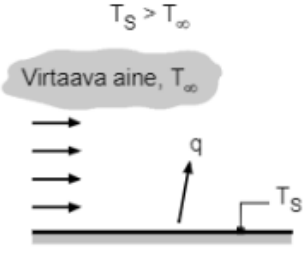
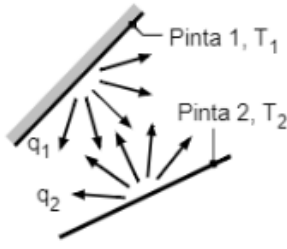
Lämpöenergia, Q (J, kWh), lasketaan kaavalla 2.

$$Q = \phi \cdot t \quad (2)$$

ϕ on lämpövirta, W

t on aika, s

Kuvassa 9 havainnollistetaan lämmön siirtymismuotoja, jotka ovat johtuminen, konvektio ja säteily.

Johtuminen kiinteän aineen läpi	Konvektio pinnasta virtaavaan aineeseen	Nettosäteily kahden pinnan välillä
		

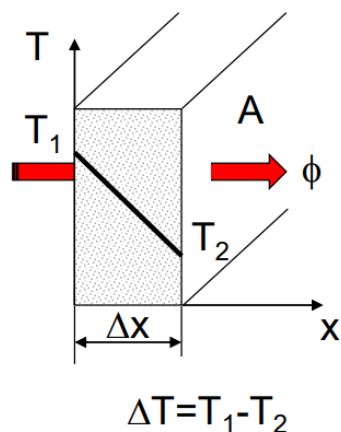
Kuva 9. Lämmön siirtymismuodot [16].

Johtumisessa lämpöenergia siirtyy materiaalin molekyyleissä tapahtuvan sisäisen värähtelyn vaikutuksesta ilman, että molekyyliden paikat vaihtuisivat. Lämmön johtumista tapahtuu myös lämpöä luovuttavan pinnan ja virtaavan nesteen tai kaasun välillä pinnan välittömässä läheisyydessä. Konvektiota ei voi täysin erottaa johtumisesta, koska lämpöä luovuttavassa pinnassa lämmön on ensin siirryttävä johtumalla ohi virtaavaan väliaineeseen. [16.]

Kuvassa 10 esitetään homogeenisessa ja isotrooppisessa ainekerroksessa johtumalla siirtyvä lämpövirta, joka voidaan laskea Fourierin lain avulla kaavalla 3. [17.]

$$\phi = \lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (3)$$

- ϕ on lämpövirta, W
- λ on lämmönjohtavuus, W/Km
- Δx on seinämän paksuus, m
- A on seinämän pinta-ala, m²
- ΔT on pintojen 1 ja 2 välinen lämpötilaero, K (°C)



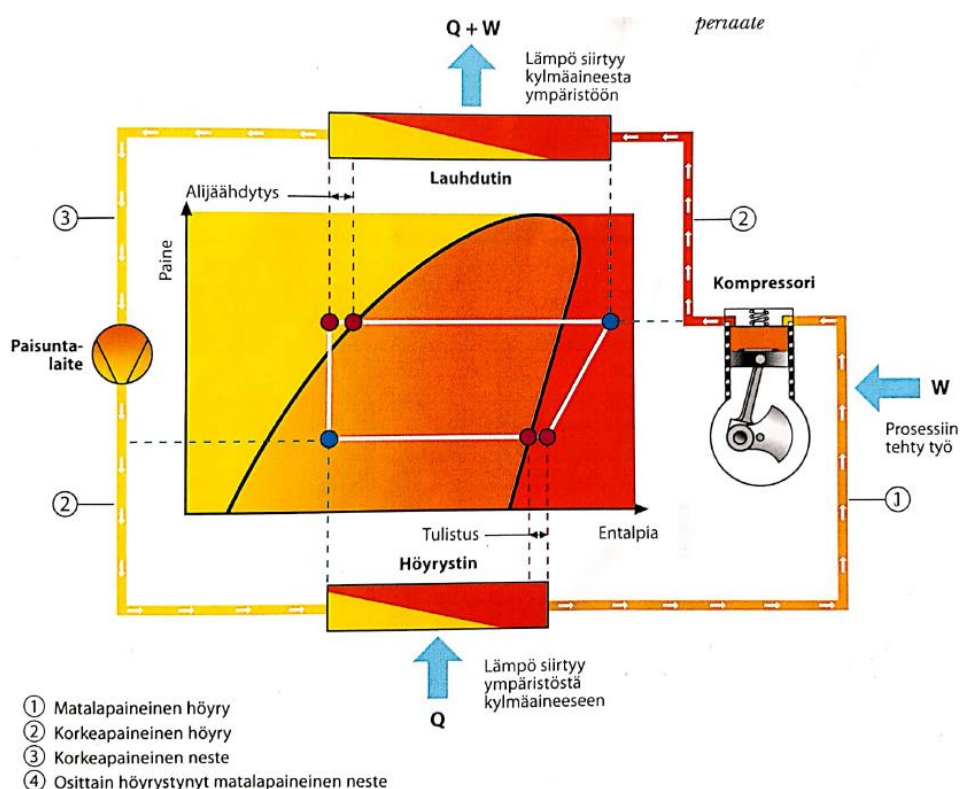
Kuva 10. Tasa-aineisen lämmön johtumisen merkinnät [17].

Pinta-ala yksikköä kohden laskettua lämpövirtaa kutsutaan lämpövirran tiheydeksi q . Jatkuvuustilassa tasa-aineisen seinämän lämpötila muuttuu lineaarisesti ja materiaali-kerroksen läpi siirtyvä lämpövirran tiheys voidaan laskea kaavalla 4. [17.]

$$q = \frac{\phi}{A} = \lambda \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (4)$$

4.2 Lämpöpumpun toimintaperiaate

Kylmäteknisessä kiertoprosessissa siirretään prosessiin tehdyn työn avulla lämpöä matalammasta lämpötilasta korkeampaan. Kylmäteknisessä kiertoprosessissa työaineena toimii kylmäaine, jonka höyrystämiseen ja lauhduttamiseen eri painetasoilla koko kierto-prosessi perustuu. [18, s. 17.] Kuvassa 11 on esitetty kylmäteknisen kiertoprosessin periaate ja se, missä olomuodossa kylmäaine prosessin eri osissa esiintyy.



Kuva 11. Kiertoprosessin periaate [18].

Höyrystimessä matalapaineinen ja -lämpötilainen kylmäaine sitoo lämpöä ympäristöstään ja höyrystyy. Tämän jälkeen höyrystynyt kylmäaine imetään kompressoriin, joka puristaa kylmäaineen korkeampaan paineeseen. Puristuksen aikana kylmäaine tulistuu ja sen lämpötila nousee merkittävästi. Kompressorin jälkeen korkeapaineinen ja -lämpötilainen tulistunut höyry johdetaan lauhduttimeen, jossa se tiivistyy nesteeksi eli lauhtuu luovuttaen lämpöä ympäristöön. Lauhduttimesta kylmäaine johdetaan paisuntalaitteelle, jossa nestemäisen kylmäaineen paine pienenee. Tällöin se höyrystyy osittain, mikä aiheuttaa sen voimakkaan jäähtymisen. Matalassa lämpötilassa kylmäaine voi kerätä lämpöä esimerkiksi jätevedestä. Jos kylmäaine ei ole lämmönlähdettä matalammassa lämpötilassa, se ei voi kerätä lämpöenergiaa. Tämän jälkeen kiertoprosessi alkaa jälleen alusta. [18, s. 18.] Jäteveden lämmöntalteenottolaite kytketään lämpöpumpun höyrystinpuolelle, josta siirretään lämpöenergiaa niin paljon kuin mahdollista. Tällä tavalla lämpöenergiaa saadaan siirrettyä eteenpäin lauhdutinpuolelle. Tässä tapauksessa lämpöä siirretään käyttöveden ja lattialämmityksen menoveden lämmittämiseen.

Termodynamiikan 2. pääsäännön mukaan lämpö siirtyy luonnostaan aina korkeammasta lämpötilasta matalampaan. Haluttaessa lämmön siirtyvän matalammasta lämpötilasta korkeammalle lämpötilatasolle täytyy systeemiin aina tehdä työtä. Kylmäteknisessä kiertoprosessissa systeemiin tehty työ on kompressorin vietyä sähköenergiaa. Kompressorin sähköverkosta ottama sähköenergia muuttuu lämpöenergiaksi, josta osa siirtyy kylmäaineeseen ja osa poistetaan kompressoria jäähdyttämällä ympäröivään ilmaan tai jäähdyttävään väliaineeseen, esimerkiksi veteen. Termodynamiikan 1. pääsäännön mukaan energiaa ei häviä, se muuttuu ainoastaan muuttua toisiksi energiamuodoiksi. [18, s. 18.]

Näiden fysikaalisten ilmiöiden pohjalta voidaan todeta, että energia ei häviä mihinkään vaan se muuttuu yhdestä olomuodosta toiseen. Samalla tavalla suihkusta ja käyttövedestä saatava lämpöenergia ei häviä mihinkään, vaan se on uudelleen käytettävää energiaa lämmitysjärjestelmiin.

4.3 Lämpö- ja kylmäkerroin

Kylmäkerroin ε on kylmäprosessin hyötysuhteesta käytetty nimitys. Kylmäkerroin lasketaan kaavalla 5 jakamalla höyrystimen sitoma lämpö Q_o kompressorin tekemällä työllä W . [19.]

$$\varepsilon = \frac{Q_o}{W} \quad (5)$$

ε on kylmäkerroin
 Q_o on höyrystimen sitoma lämpö
 W on kompressorin tekemä työ

Lämpökerroin φ eli COP (Coefficient of Performance) on lämpöpumpun hyötysuhteesta käytetty nimitys. Lämpökerroin lasketaan kaavalla 6 jakamalla lauhduttimen luovuttama lämpö Q_L kompressorin tekemällä työllä W . [19.]

$$\varphi = \frac{Q_L}{W} \quad (6)$$

- φ on lämpökerroin
 Q_L on lauhduttimen luovuttava lämpö
 W on kompressorin tekemä työ

Koska $Q_L = Q_h + W$, voidaan lämpökerroin laskea myös kaavalla 7.

$$\varphi = \varepsilon + 1 \quad (7)$$

Jos COP on esimerkiksi 4, lämpöpumppu tuottaa yhdellä kilowattitunnilla sähköenergiaa 4 kilowattituntia lämpöenergiaa.

5 Jäteveden LTO:n potentiaali ja käyttöveden kulutusjakauma

5.1 Jäteveden LTO:n potentiaali

Jäteveden määrä ja lämpötila vaikuttavat siitä saatavissa olevaan energianmäärään. Energiamäärä voidaan laskea kaavalla 8. [20.]

$$E = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (8)$$

- m on jäteveden määrä, kg
 c_p on veden ominaislämpökapasiteetti, 4,186 kJ/(K·kg)
 ΔT on veden lämpötilaero, K

Lämpimän talousveden osuus veden kokonaiskulutuksesta on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. Lämpimän talousveden osuus eri tilojen mukaan [20].

Tilat	Lämpimän veden osuus %
Asuinkiinteistöt (+ talouspesuvesien lämmitys asuintiloissa)	30-40
Uimahallit ja kylpylät	40-50
Teollisuuspesulat	50-70
Autoklaavipesulinjat	60-90

Jäteveden LTO-laitteella voidaan ottaa kiinteistön jätevedestä lämpöä talteen passiivisella käyttöveden esilämmityskytkennällä tai aktiivisella lämpöpumppukytkenällä. Kytkenätyyppi vaikuttaa merkittävästi jätevedestä saatavan energiamäärään. Kytkenämahdollisuutta on syytä tiedustella paikalliselta lämmöntoimittajalta [20]. Yleensä kaukolämpökohteissa tulee turvata kaukolämpöveden riittävä jäähtymä kuvassa 3 esitetyllä kytkennällä. Passiivinen jäteveden LTO-laitteisto kylmän veden esilämmitykseen se ei tällöin sovellu.

Lämpöpumppukytkenä suositellaan paremman jäteveden LTO-hyötysuhteen saavuttamiseksi ja yleensä nopeamman takaisinmaksuajan takia. Jos kuitenkin halutaan suunnitella käyttöveden esilämmityskytkentä, tulee sen soveltuvuus aina tarkistaa ja hyväksyttää alueen kaukolämpöyhtiöltä. [20.]

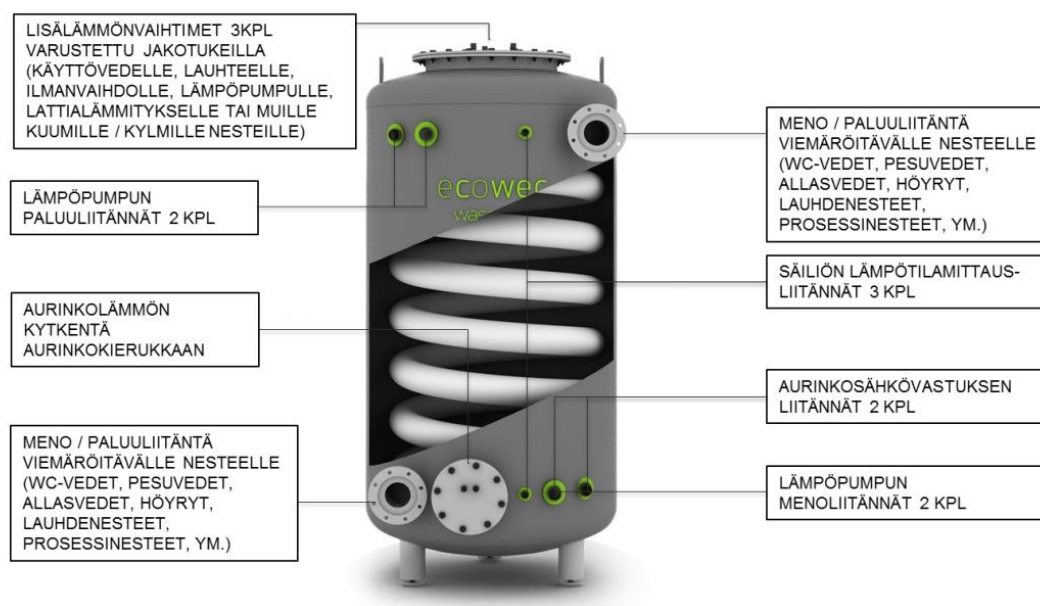
Lasketaan esimerkkinä 400 asukkaan kerrostalon lämpimän talousveden lämmittämiseen tarvittava vuosienergia. Oletetaan kokonaiskulutukseksi 155 l/(hlö, vrk) ja lämpimän veden osuudeksi 40 %, lämpötilaksi 58 °C sekä kylmän veden lämpötilaksi 8 °C. [20.]

$$\text{Veden kokonaiskulutus} = 400 \text{ hlö} \cdot \frac{155 \text{ l}}{\text{hlö, vrk}} \cdot \frac{365 \text{ vrk}}{v} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ l}} = 22630 \frac{\text{m}^3}{v}$$

$$\text{Lämpimän veden osuus} = 0,4 \cdot 22630 \frac{\text{m}^3}{v} = 9052 \frac{\text{m}^3}{v}$$

$$E = 9052 \frac{\text{m}^3}{v} \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4,186 \frac{\text{kJ}}{(\text{kg}, K)} \cdot (58 - 8)^\circ\text{C} \cdot \frac{1 \text{ kWh}}{3600 \text{ kJ}} = 526273 \frac{\text{kWh}}{v}$$

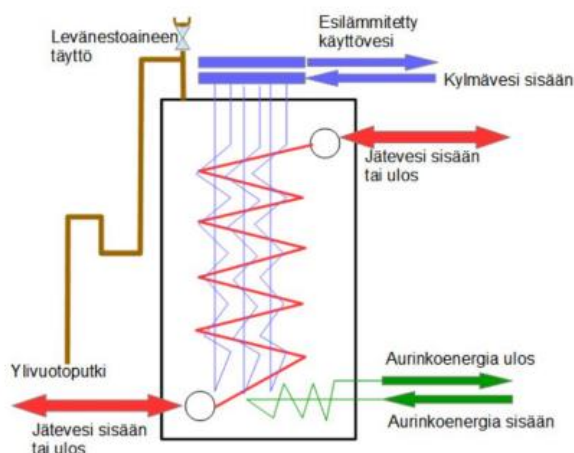
Vähäinen osa tästä lämpimästä vedestä höyrystyy, jolloin höyrystymiseen kulunut lämpö poistuu poistoilman mukana. Pieni osa lämmöstä siirtyy hormitilaan, eikä se hyödytä asuntoja. Valtaosa lämmöstä siirtyy jäteveden mukana viemäriin. Lisäksi lämpimän veden kiertojohtoon lämmittämiseen kuluu energiaa.



Kuva 12. Jäteveden lämmöntalteenottojärjestelmän Ecowec R10:n 3D mallikuva [31].

Kuvasta 12 nähdään jäteveden lämmöntalteenoton säiliön rakenne. Iso spiraali kiertää säiliön sisällä, jonka avulla voidaan siirtää lämpöä eteenpäin. Spiraalin materiaalina on Rst-putki. Viemärit kytketään kokoa DN 100 oleviin yhteisiin. Alhaalla oleva DN 150 - umpilaippa mahdollistaa kytkennän aurinkolämpöjärjestelmän lämmönsiirtimelle, joka on lisävaruste. Lämpöpumpun meno- ja paluupiirit liitetään 2":n sisäkierteellä oleviin liitosyhteisiin, jotka sijaitsevat säiliön ylä- ja alapuolella.

Laitevalmistajan mukaan karkeasti arvioiden passiivisella käyttöveden esilämmityksellä saavutetaan 15–30 % ja lämpöpumppukytkennällä 50–95 % jäteveden LTO-hyötysuhde. Isommissa kiinteistöissä lämpöpumppukytkennöissä voidaan käyttää useampaa jäteveden LTO-siirrintä rinnan- tai sarjakytkennällä. Rinnakkaiskytketyillä LTO-laitteilla voidaan käsitellä kaksinkertaista jätevesivirtaa ja sarjaan kytketyillä LTO-laitteilla saadaan poistuvan jäteveden lämpötila matalammaksi. Lämpöpumppukytkennöissä jätevettä ei saa jäädyttää liikaa, jotta LTO-siirtimen sisällä oleva jätevesi ei jäädy ja riko lämmönsiirto-putkea LTO-säiliön sisällä. [20.]



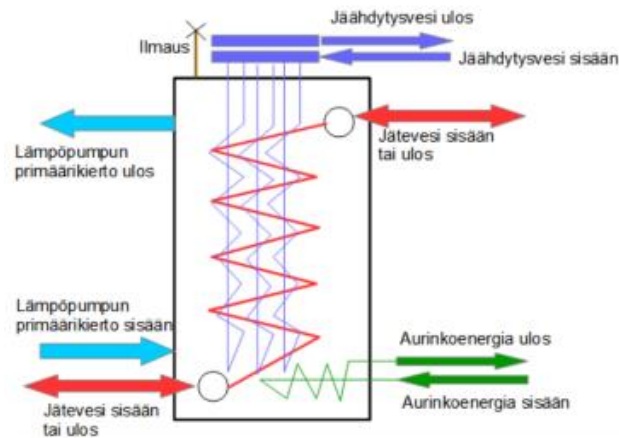
Kuva 13. Käyttöveden esilämmityksen, jäteveden ja aurinkoenergian kytkentäesimerkki [31].

Kuvassa 13 esitetyllä passiivisella käyttöveden esilämmityksellä tarkoitetaan LTO-säiliötä, johon ei kytketä lämpöpumpun ollenkaan. Käyttövesi kytketään tällöin siirtimen yläpuolella olevaan jakotukkiin, joka siirtää lämpöä säiliövedestä käyttöveden esilämmitykseen. Jätevesi ei voi sekoittua käyttöveteen, koska jätevesi ja käyttövesi kulkevat omissa lämmönsiirtimissä. Punaisella on merkattu spiraaliputki, jossa jätevesi virtaa. Spiraalin sisällä kulkee kolme kierukkaputkilämmönsiirintä, joissa kiertää käyttövesi. Vihreällä on merkitty aurinkolämpökerääjien energiaa siirtävä kierukkaputkilämmönsiirrin.

Kuvan 14 lämpöpumpputykennällä tarkoitetaan LTO-säiliötä, jossa otetaan sen lämpöpumpulle tarkoitetut liitoskytkennät käyttöön ja lämpöpumppu liitetään järjestelmään. Tällöin LTO-siirrin voi siirtää jätevedestä saatavaa lämpöenergiaa lämpöpumpun primäärikiertoon tehokkaasti. Järjestelmä on monipuolinen. Lämpöpumpun höyrystimellä jäähdytettyä liuosta johdetaan säiliön alaosaan ja säiliön liuos jäähtyy matalampaan lämpötilaan. Tällöin jätevesi jäähtyy spiraaliputkessa tehokkaasti, koska lämpötilaero jäteveden ja ympäröivän säiliöliuoksen välillä on suuri. Aurinkolämpöjärjestelmän toiminta tehostuu, koska kierukkaputkilämmönsiirtimessä kiertävä liuos jäähtyy voimakkaasti. Tällöin aurinkolämpökerääjien hyötysuhde paranee. Lisähyötynä on, että jäähdytettyä säiliöliuosta voidaan hyödyntää jäähdytykseen. Nyt kolmessa kierukkaputkilämmönsiirtimessä ei virtaa esilämmitettävä käyttövesi, vaan jäähdytysjärjestelmään johdettava vesi. Lämpöpumpulla on tässä siis kolme lämmönlähdettä:

- aurinkolämpökerääjät

- tilojen yllämmön poisto
- jätevesi.



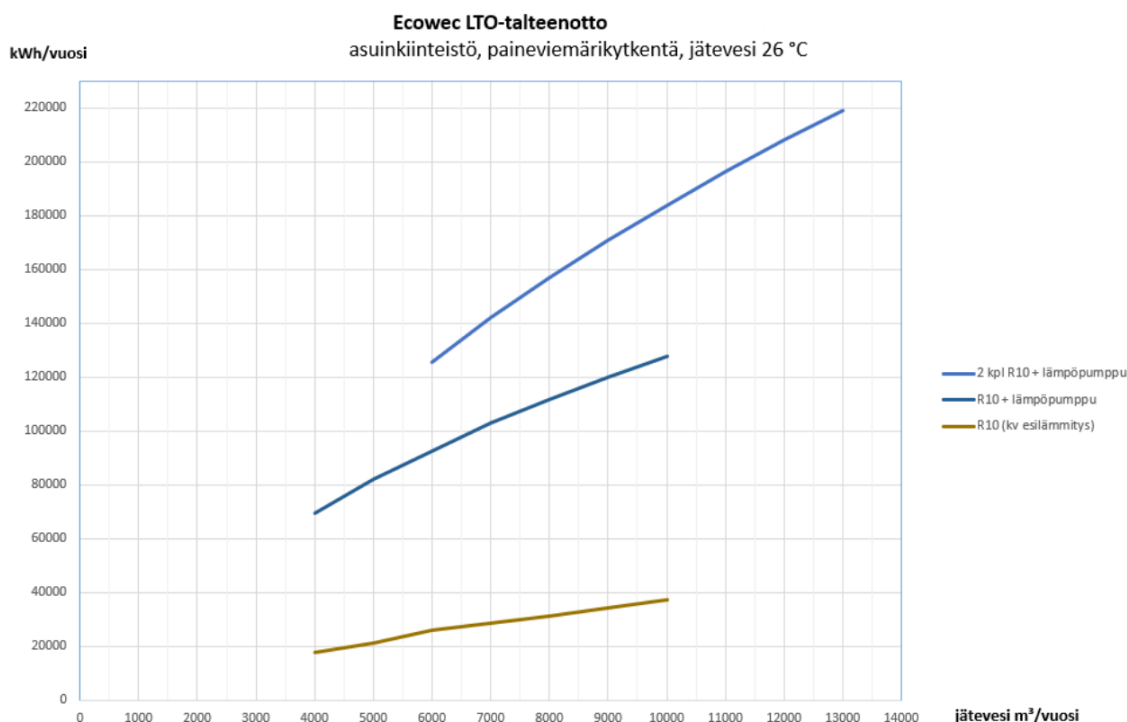
Kuva 14. Lämpöpumpun, jäteveden, jäähdytyksen ja aurinkoenergian kytkentäesimerkki [31].

Jäteveden LTO-laitteistojen määrä vaikuttaa saavutettavaan jäteveden LTO-hyötysuhteeseen. Mitoituksessa tulee huomioida suunnittelun tavoitetaso mm. kiinteistön energialuokitukseen, muihin energiasäästötoimenpiteisiin ja investoinnin kustannuksiin sekä takaisinmaksuaikaan. Passiivisissa käyttöveden esilämmityskytkennöissä ja painovoimaisessa viemärikytkennässä voidaan käyttää yleensä vain yhtä jäteveden LTO-siirintä. Poikkeuksena ovat erittäin suurten jätevesimäärien LTO-ratkaisut teollisuudessa, pesuloissa tai uimahalleissa. Lämpöpumppukytkennöissä kiinteistöön voidaan sijoittaa useampia jäteveden LTO-laitteistoja, joista kerätään jäteveden sisältämää lämpöä samaan lämpöpumppupiiriin rinnan- tai sarjakytkennällä. [20.]



Kuva 15. Esimerkki painovoimaisesta viemäröinnistä [31].

Kuvan 15 painovoimaisella viemäriytkennällä tarkoitetaan tilannetta, jolloin ei käytetä ollenkaan pumppaamoa, vaan kaikki jätevesi tulee siirtimelle painovoimaisesti. Painovoimaisessa järjestelmässä on suositeltavaa, että ei käytä kahta LTO-siirrintä, koska jälkimmäinen siirrin voisi helposti tukkeutua. Paineviemäreissä taas käytetään pumppaamoa, jolla saadaan pumpattua jätevesi alhaalta ylöspäin jätevesisiirtimen läpi ja tässä tilanteessa toinen LTO-siirrin on hyvä valinta, jolloin saadaan paremmin lämpöä talteen. Pumppujen avulla LTO-laitteiden läpi pystytään johtamaan suurempi jätevesivirtaama kuin painovoimaisessa tapauksessa.



Kuva 16. Ecowec R10, tuottotaulukko [21].

Painovoimaisissa kytkennöissä maksimi mitoitusvirtaama on noin 20 l/s ja paineviemäroinnissä maksimi mitoitusvirtaama on noin 100 l/s [20]. Kuva 16 havainnollistaa, miten lämpöpumpulla voidaan saada enemmän lämpöenergiaa talteen vuodessa verrattuna pelkästään käyttöveden esilämmitykseen. Hyvä on kuitenkin ottaa huomioon, että lämpöpumppu on kallis investointi ja se käyttää myös sähköä, jolloin myös energiankulutus kasvaa eikä pelkästään tuotto.

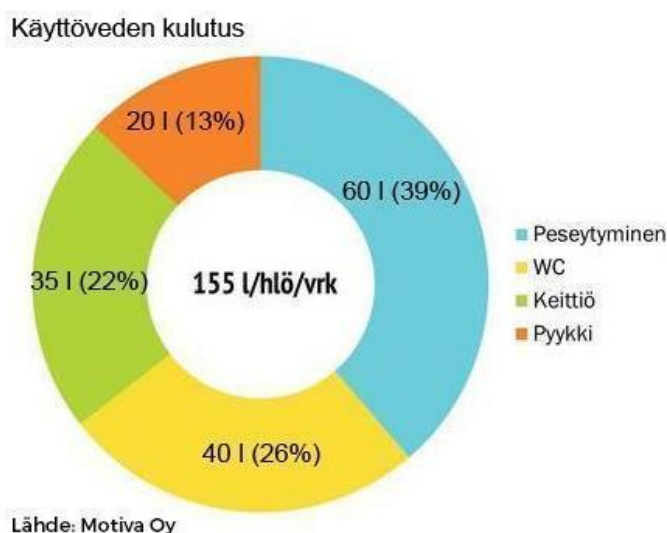
Tutkimuskohteessa viemärit ovat painovoimaisia rakennuksen hormeista lähtien, mutta lähellä olevien pumppujen avulla jätevesi pumpataan jäteveden lämmöntalteenottojärjestelmän kautta takaisin kunnalliseen viemäriin. Pumppujen ansiosta pystytään käyttämään kahta jäteveden lämmöntalteenottosiirrintä. Pumppujen valinnassa ja mitoituksessa tulee ottaa huomioon jätevesivirtaaman määrä. Tällöin ei tule semmoista tilannetta, että jätevettä tulee liikaa pumpun kapasiteettiin nähden. Pumppuja on hyvä valita kaksi, koska tällöin pystytään varmistamaan järjestelmän toimivuus, jos toinen pumppu menee rikki. Pumput toimivat vuorotteluohjelman mukaisesti, siten että toinen käy koko ajan ja toinen ei.

5.2 Käyttöveden kulutusjakauma

Lämpimän käyttöveden jakaumasta on tehty tutkimuksia ja Eetu Laaksonen on tarkastellut tätä omassa opinnäytetyössään [22]. Laaksonen kertoo, että lämpimän veden kulutusprofiilia on tutkittu Annex 42- ja IEA/SHC Task 26 -tutkimuksissa. Näiden tutkimusten tarkoitus on verrata eri maiden lämpimän veden kulutusta vuorokaudessa tuntitasolla. Suomessa lämpimän käyttöveden kulutus painottuu selkeästi enemmän iltaan verrattuna esimerkiksi Kanadaan tai Saksaan. Useimpien muiden maiden lämpimän veden kulutus jakautuu selkeästi enemmän aamuun kuin iltaan. [22, s. 22.]

Käyttövettä kulutetaan noin 155 litraa henkilöä kohden vuorokaudessa Suomessa. Poikkeuksena ovat rivitalot, joissa lukema on 140 litraa henkilöä kohden vuorokaudessa. Lämpimän veden osuus käyttövedestä on 40 % ja kylmän veden osuus 60 %. [23.]

Niissä taloyhtiöissä, joissa on otettu käyttöön huoneistokohtainen vedenmittaus, on keskimäärin saavutettu 10–30 % säästöä kokonaisvedenkulutuksessa ja 3–9 % säästöä lämmitysenergiankulutuksessa. Vaikka keskimääräinen vedenkulutus on taloyhtiössä 155 l/hlö/vrk, kulutuslukemat voivat vaihdella kotitalouksien välillä huomattavasti. Taloyhtiöissä, joissa on siirrytty huoneistokohtaiseen vedenkulutuksen mittaukseen, on huomattu kulutuksissa huomattavaa vaihtelua. [23.]



Kuva 17. Käyttöveden jakauma eri käyttökohteisiin vuorokaudessa henkilöä kohden [23].

Kerrostalo-yhtiöiden, joista huoneistokohtaiset vesimittarit puuttuvat, vuorokautinen kokonaisvedenkulutus jakautuu keskimäärin seuraavasti kuvan 17 mukaisesti:

- peseytyminen 60 litraa (39 %)
- WC 40 litraa (26 %)
- keittiö 35 litraa (22 %)
- pyykki 20 litraa (13 %).

Huomioitavaa on, että vaihtelua voi kuitenkin tapahtua kiinteistössä käyttäjän mukaan. Vaihtelu on seurausta erilaisista käyttötottumuksista, perheiden elämänvaiheista ja eroista kotona vietetyssä ajassa. [23.]

6 Tutkimiskohteen esittely

6.1 Rakennuksen esittely

Kohde on uudisasuinkerrostalo Helsingissä, jossa on 14-kerroksinen torniosa ja matalampi 7-kerroksinen lamelliosa. Asuntoja on yhteensä 153. Kummankin asuinkerrostalon yhteenlaskettu lämmitetty nettoala on 13239 m². Kiinteistö liitetään Helenin kaukolämpöverkkoon. Käyttövesi otetaan HSY:n vesijohtoverkostosta. Jätevesi ohjataan jäteveden lämmöntalteenoton kautta kunnalliseen viemäriin. Vesikatoilla sijaitsevat IV-konehuoneet, joiden avulla tehdään keskitetty tulo-poistoilmanvaihto. Talon nousukuilut toteutetaan pääosin elpo-hormi-menetelmällä, jonka perusideana on koota kerrostalon nousuputkisto yhteen nippuun ja asentaa koko betonirunkoon valettu paketti kerroksittain kerralla paikoilleen.

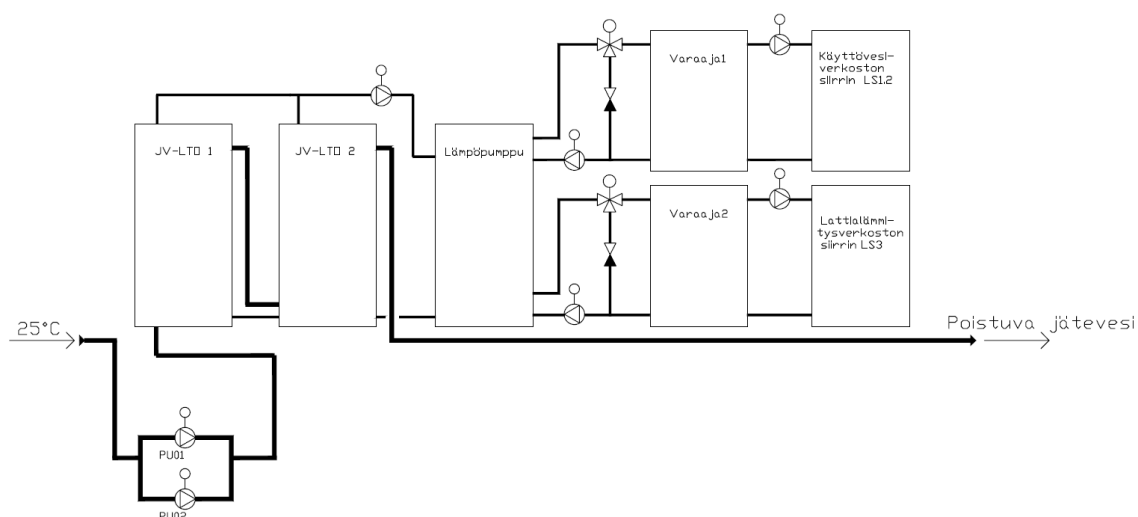
Jokainen asunto varustetaan asuntokohtaisella kylmän ja lämpimän veden mittauksella. Vesimittarit asennetaan kylpyhuoneisiin. Vesimittarit varustetaan huoneistokohtaisella näytöllä, joka sijoitetaan eteisen seinälle. Mittaustietojen keruuyksikkö asennetaan lämmönjakohuoneeseen. Sillä voidaan seurata, kuinka paljon lämmintä sekä kylmää vettä on käytetty kussakin asunnossa. Lämmintä jätevettä oletetaan tulevan vain vähän yön aikana ja paljon enemmän, kun ihmiset heräävät ja käyttävät suihkua aamulla. Tämän jälkeen käyttö tasaantuu, kunnes taas iltapäivällä ja alkuillasta käyttö lisääntyy. Astian-

pesukoneet kytketään kylmävesijohtoon. Astianpesukone hoitaa kylmän veden lämmityksen pesuohjelman mukaisesti pesun aikana. Samalla tavalla toimivat pyykinpesukoneet. Jätevettä oletetaan saatavan keskilämpötilalla 25 °C, josta 40 % kuumaa ja 60 % kylmää vettä.

$$0,4 \cdot 55^{\circ}\text{C} + 0,6 \cdot 5^{\circ}\text{C} = 25^{\circ}\text{C}$$

Kohteen suunnittelussa ja rakentamisessa pyritään energiaa säästäviin ja ekologisesti kestäviin ratkaisuihin ottaen huomioon rakennusten koko käyttöajan elinkaarikustannukset. Suunnittelussa ja rakentamisessa noudatetaan niitä koskevia lakeja, määräyksiä ja asetuksia.

6.2 Jäteveden LTO-järjestelmän toiminta

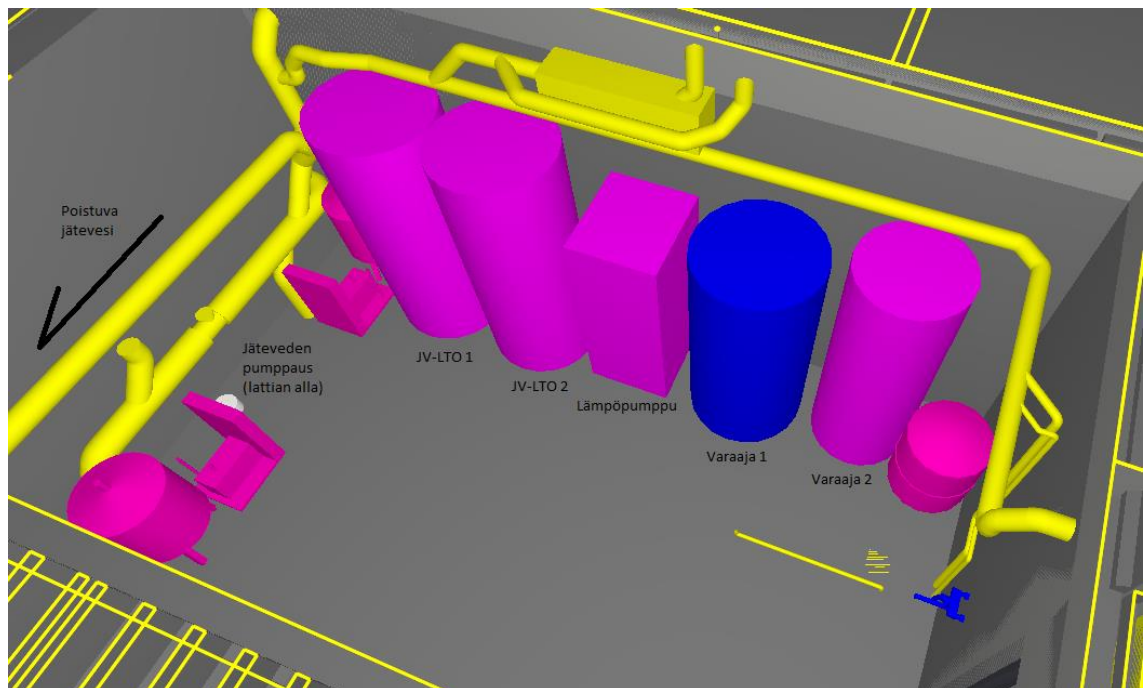


Kuva 18. Jäteveden LTO-järjestelmän toimintakaavio.

Jäteveden lämmöntalteenottojärjestelmä toimii niin, että jätevesi pumpataan ja ohjataan Ecowec jäteveden lämmöntalteenottosiirtimeen kautta takaisin kunnalliseen viemäriin. Jäteveden lämmöntalteenoton siirrin 1 ja 2 siirtää lämpöenergiaa lämpöpumpun glykoliputkiston kautta lämpöpumpun höyrystinpuolelle. Varaajan 1 ja 2 putket yhdistyvät lämpöpumpun sisällä samaan lauhduttimeen. Järjestelmässä on varaajat pidentämään lämpö-

pumpun käyntijaksoa ja tasaamaan kulutushuippua. Lämpötilaa voidaan nostaa käyttöveden ja lattialämmityspiirin tarpeen mukaisesti automaation avulla ja siten sitä ohjataan käyttöveden lämmönsiirtimelle LS 1.2 ja lattialämmitysverkoston lämmönsiirtimelle LS 3.

Järjestelmä säädetään niin, että kun lämpöä ei saada riittävästi lattialämmityksen ja käyttöveden lämmönsiirtimiin jäteveden lämmöntalteenottojärjestelmästä, kaukolämpö hoitaa tämän vajauksen. Siten missään tapauksessa ei ole ongelmaa, että lämpöä ei saisi riittävästi järjestelmään. Kuvan 5 mukaisesti kaukolämmön ensiöpuolella on kaksitieventtiilit, joilla säädetään riittävä kaukolämpövesivirta halutun lattialämmityspiirin menoveden lämpötilan saavuttamiseksi ja halutun lämpimän käyttöveden lämpötilan saavuttamiseksi. Lattialämmityspiirissä on lisäksi kolmitieventtiili, jolla säädetään rinnakkaislämmönsiirtimen LS 3 ja kaukolämmönsiirtimen LS 2 virtaamien suhteen siten, että talteenottoteho on suurimmillaan.



Kuva 19. Jäteveden LTO-järjestelmä (Solibri Office 3D-mallinnusohjelma) [24].

Kuvasta 19 nähdään, kuinka jäteveden lämmöntalteenottojärjestelmä on sijoitettu lamelliasuinkerrostalon lämmönjakohuoneeseen. Järjestelmä on hyvä sijoittaa tekniseen tilaan, koska siellä on hyvä paikka huoltaa jäteveden LTO-järjestelmää. Tämän lisäksi

sinne tulee asuinrakennuksen muuta tekniikkaa, esimerkiksi kaukolämpöpaketti, päävesimittari ja putkimattoja, joten laitesijoittelut ovat tarpeen suunnitella tarkasti.

7 Jäteveden LTO-järjestelmällä saavutettavat säästöt

7.1 Kustannusarvio

Taulukossa 9 on esitetty arviointi järjestelmän kustannuksista. Jäteveden lämmöntalteenottojärjestelmän kannattavuuden arvioimisessa olevat luvut ovat arvioita ja niiden lopullinen tarkkuus johtuu useista eri tekijöistä. Yksi iso tekijä on se, kuinka paljon käytöstä käytetään päivän aikana. Tämä vaikuttaa vuodessa saatavaan energiansäästöön ja takaisinmaksu-aikaan. Viemäristä tulee jätevettä jaksottaen, ei jatkuvasti. Laitetoimitajan laskelmissa käytetään lämpöpumpun tehona 50 kW. Tällä tavalla saadaan katettua jopa noin puolet (49 %) koko kiinteistön lämmityksen tarpeesta vuoden aikana. [25.]

Taulukko 9. Jäteveden LTO-järjestelmän arvio investointikustannuksista.

Investointikustannus (€)	Arvio
2x JVLTO + eristeet	57800
Lämpöpumppu + varaajat	35000
Energiamittari + etäseuranta	9900
Putkistontarvikkeet	10000
Asennus / työ	10000
Yhteensä	122700

Taulukosta 10 nähdään kannattavuuden tulokset laitevalmistajan mukaan. Jäteveden lämmöntalteenottojärjestelmän investointikustannus on noin 122 700 € ja sillä saavutettu vuotuinen säästö noin 9 200 €/a. Järjestelmän takaisinmaksuajaksi tulee näin ollen noin 13,3 vuotta. Vaikutus E-lukuun on noin $-5 \text{ kWh}_E/(\text{m}^2\text{a})$. E-luku lasketaan kaavalla 1. Lämpötilaa ei kannata ajaa aina mahdollisimman korkeaan lämpötilaan, koska lämpöpumpun lämpökerroin pienenee merkittävästi ja kasvava sähkönkulutus huonontaa järjestelmän taloudellista kannattavuutta. Kaikki hinnat ovat arvolisäverottomia.

Taulukko 10. Jäteveden LTO-järjestelmän kannattavuuden arviointi.

Kulutus (kWh/a)	JVLTO + LP
Kaukolämpö	-363800
Sähkö	84600
Yhteensä	-279200
Kustannus (€/a)	
Kaukolämpö	-17608
Sähkö	7504
Huolto*	900
Yhteensä	-9204
Investointikustannus (€)	122700
Takaisinmaksuaika (a)	13,3
Vaikutus E-lukuun (kWh _E /m ²)	-5
Lämpöpumpun keskim. lämpökerroin	4,3
*Huolto sisältää lämpöpumpun kompressorin vaihdon	

Kaukolämmön hintana on käytetty lukemaa 48,4 €/MWh ja sähkön hintana 88,7 €/MWh. Energian reaalin hintojen nousu oletettiin yhtä suureksi kuin reaalin laskentakorko. Laskennassa on huomioitu myös järjestelmän huolto, joka vaikuttaa elinkaaren aikana tapahtuvaan säästöön laitetoimittajan mukaan. Elinkaarikustannukset on laskettu 20 vuoden laskentajaksolla.

7.2 Kirjallisuustutkimuksen tulokset

Jäteveden lämmöntalteenottojärjestelmä on aiheena melko uusi. Mittaustuloksia järjestelmän suorituskyvystä ja toteutuneista säästöistä ei ole vielä paljon. Muutamia opinnäytetöitä on kuitenkin tehty ja seuraavassa tarkastellaan, minkälaiseen tulokseen Timo Torvinen, Timo Kekkonen, Ville Raittinen ja Antti Turpeinen ovat päässeet jäteveden lämmöntalteenottojärjestelmästä. [26; 27; 28; 29.]

Torvisen mukaan jäteveden lämmöntalteenottojärjestelmä on yksi tulevaisuuden painopisteistä asuinkerrostaloissa hyvän säästöpotentiaalin ansiosta. Ongelmaa esiintyy kuitenkin vanhoissa rakennuksissa. Silloin, kun vanhat asuinkerrostalot on rakennettu, ei ole päästy niin hyviin U-arvoihin kuin nykyisissä uudiskerrostaloissa. Siten rakennuksen lämmitystehontarve on vanhoissa rakennuksissa usein suuri. Torvinen tarkasteli,

kuinka jätevedenlämmöntalteenottoa hyödynnetään pelkästään käyttöveden lämmittämiseen. Käytössä olevan kohteen mitatun datan ansiosta saatiin tarkka lukema käyttöveden energiansäästöksi, joka oli 21 %. Järjestelmän tuoma hyöty riippuu siitä, kuinka paljon käyttövettä käytetään kerrostalossa. Kytkentä toteutettiin K1/2013:n rinnakkaislämmön kytkentäperiaatteen mukaisesti. Jäteveden lämmöntalteenottojärjestelmän yhteydessä oli lämpöpumppu. [26.]

Kekkonen pääsi samantapaiseen lopputulokseen energiansäästöpotentiaalista jäteveden lämmöntalteenottojärjestelmän ansiosta. Kekkonen tutkimuksen mukaan lämmöntalteenoton lämmönsiirtimeen on mahdollista tehdä jäteveden lämmöntalteenottojärjestelmän lisäksi muita kytkentöjä, esimerkiksi keskitetyn ilmanvaihdon jäähdytyspatterin lisääminen järjestelmään. Jäteveden ja lämpöpumpun yhdistetyllä lämmöntalteenottojärjestelmällä saatiin tuotettua jopa yli puolet 58 % käyttöveden valmistukseen tarvitsevasta lämpöenergiasta laskennallisesti. E-lukua saatiin tiputettua arvoon $-2,4 \text{ kWh}_E/(\text{m}^2\text{a})$. Kekkonen arvioi, että Ecowecin LTO-järjestelmän lämpöpumppukytkennän avulla pystytään toteuttamaan hyvin jäteveden lämmöntalteenottojärjestelmän tekninen puoli. [27.]

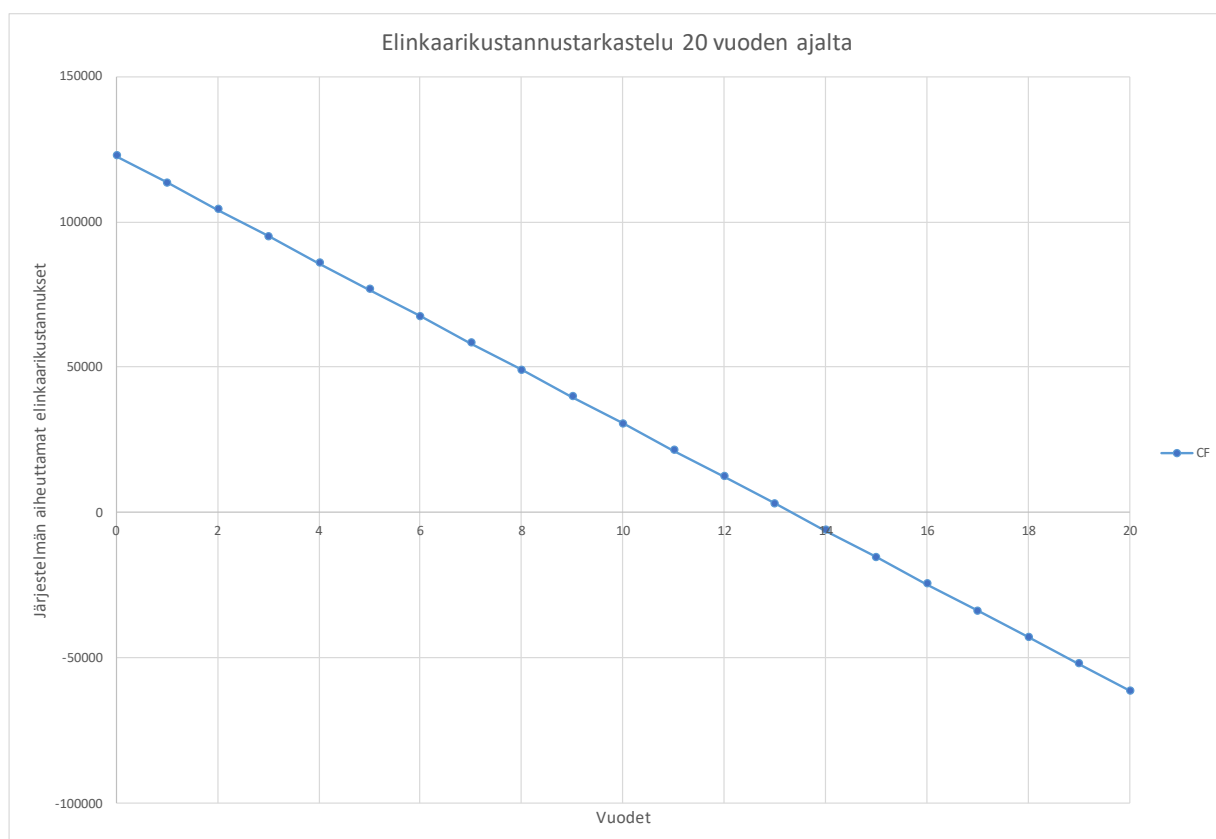
Raittisen laskelmien ja tutkimuksen mukaan jäteveden LTO-järjestelmän kannattavuuden kannalta on tarkasteltava, riittääkö järjestelmä kattamaan koko vuoden lämmitysenergian tarpeen käyttöveden lämmittämiseen. Suositeltavaa on, että otetaan toinen lämmitysmuoto rinnalle. Tällä varmistetaan lämmön saatavuus huippukuorman aikana käyttöolosuhteista huolimatta. Tiedossa ei ollut todellista kohdetta, joten tarkkaa mitattua dataa ei saatu käyttöön. Raittinen suosittelee, että jäteveden lämmöntalteenottojärjestelmä kannattaa yhdistää rakennuksen lämmitysverkkoon, jotta se vähentäisi kuormitusta pääasialliselta lämmitykseltä. [28.]

Turpeinen kertoo, että jäteveden lämmöntalteenottojärjestelmä toimii energiatehokkaasti lämpöpumpulla sekä paineviemärointikytkennän avulla. Tarkastelukohteen ansiosta saatiin mitattua jäteveden LTO-järjestelmän tuottoa. Turpeisen havainnon mukaan kahden LTO-siirtimen kautta saatava hyöty olisi vielä parempi, koska jäähtymä yhden siirtimen jälkeen on vielä vähäistä. Tällä tavalla saadaan otettua vielä lämpöenergiaa talteen toisen LTO-siirtimen kautta, jolloin lämmöntalteenotto tehostuu. Tärkeää on kuitenkin muistaa tilavaraus järjestelmälle. Uudiskohteissa tilanvarauksen suunnittelu ja toteutus

voi olla helpompaa, mutta saneerauksissa tämä voi asettaa rajoitteita järjestelmän asennukselle. [29.]

7.3 Elinkaaren tarkastelujakso

Laskentajakson pituus on määriteltävä aina tapauskohtaisesti. Se voi olla rakennuksen, järjestelmän tai komponentin elinikä tai käyttäjän määrittelemä vuokrasopimusaika. Laskentajakson pituuden valintaan vaikuttaa useita tekijöitä, esimerkiksi vertailtavat rakennevaihtoehdot ja ylläpitostrategiat. Jakson valinta on oleellinen osa elinkaarikustannuslaskentaa. Elinkaarta voidaan pitää ajanjaksona, jolloin tuote aiheuttaa käyttäjälleen kustannuksia. Taloudellisessa laskennassa on syytä käyttää laskentajaksona ns. taloudellista pitoaikaa, joka voi olla huomattavasti lyhyempi fyysisen kestävyuden pitoaikaan verrattuna. [30.]



Kuva 20. Jäteveden lämmöntalteenottojärjestelmän elinkaarikustannustarkastelu 20 vuoden ajalta.

Kiinteistön eri järjestelmille ja osille voidaan valita eripituiset pitoajat. Pitoajan peruste voi myös poiketa taloudellisesta pitoajasta tarpeen mukaan. Rakennusten taloudellinen pitoaika on aikaväli rakennuksen valmistumisesta ensimmäiseen peruskorjaukseen tai kahden peräkkäisen peruskorjauksen väli. Asuinrakennuksilla taloudellinen laskentajakso on enintään 30–50 vuotta, toimistorakennuksilla 20–40 vuotta ja liikerakennuksilla 5–20 vuotta. Tällöinkin osa tiloista saatetaan uusia huomattavasti lyhyemmällä aikavälillä. Peruskorjaus aiheutuu yleensä siitä, että rakennus on teknisesti vanhentunut erityisesti sisäosien ja taloteknisten järjestelmien osalta. [30.]

Elinkaarikustannusjaksona on tässä työssä käytetty 20:tä vuotta. Kuvassa 20 on havainnollistettu järjestelmän kannattavuutta. Noin 13,3 vuoden jälkeen jäteveden lämmöntalteenottojärjestelmä maksaa itsensä takaisin. CF kuvastaa kassavirtaa ja sitä, kuinka järjestelmä alkaa säästämään heti ensimmäisestä vuodesta alkaen.

8 Yhteenveto

Uudisrakennusten energiatehokkuus on parantunut viime vuosina merkittävästi. Ulkovai-
pan lämmöneristävyysvaatimuksia on kiristetty ja poistoilmasta otetaan lämpöä talteen
tehokkailla LTO-laitteilla. Tämä on johtanut asuinkerrostaloissa siihen, että käyttöveden
lämmittämisen osuus on noussut merkittäväksi. Uudiskerrostaloissa käyttöveden lämmi-
tykseen kuluu noin puolet koko lämmitysenergiantarpeesta. Lämmitetty käyttövesi joh-
detaan tyypillisesti kunnalliseen jätevesiviemäriin ilman, että viemäriverdestä otetaan
lämpöä talteen. EU on asettanut jäteveden lämmöntalteenoton uusiutuvaksi energian-
lähteeksi direktiivissä RED II.

Tämä insinööritoimisto tehtiin talotekniikan suunnittelu- ja konsultointitoimistolle Hepacon
Oy:lle. Työ liittyy Helsinkiin kaavaillun suuren asuinkerrostalon LVI-suunnitteluun. Ra-
kennus liitetään Helenin kaukolämpöverkkoon. Työn tavoitteena oli selvittää jäteveden
lämmöntalteenottomahdollisuuksia, Ecowec-lämmöntalteenottolaitteiston toimintaa ja
kytkentää lämmönjakokeskuksen laitteisiin sekä jäteveden lämmön talteenoton kannat-
tavuutta. Järjestelmä ajateltiin sijoitettavaksi asuinkerrostalon tekniseen tilaan lämmön-
jakohuoneeseen.

Työ tehtiin kirjallisuustutkimuksena, perehtymällä alan viranomaismääräyksiin ja ohjeisiin sekä haastatteluin ja omakohtaisin laskelmin. Jäteveden lämmöntalteenoton energia- ja kannattavuuslaskelmissa tukeuduttiin laitetoimittajan ilmoittamiin arvoihin. Hankesuunnittelun alkuvaiheessa on tarpeen selvittää paikallisen kaukolämpöyhtiön kanta ja vaatimukset, jotta voidaan varmistaa, onko kohteeseen mahdollista toteuttaa jäteveden järjestelmää. Kaukolämpömääräyksissä edellytetään riittävää jäähtymää kaukolämpövedelle ja päälämmitysmuodon ollessa kaukolämpö se on mitoitettava täydelle mitoitusteholle. Työssä esitetään kaukolämpömääräysten edellyttämä rinnakkaislämmönlähteen kytkentätapa lämpimän käyttöveden lämmitykseen ja lämmitysverkostoon.

Jäteveden lämmöntalteenottojärjestelmän tekninen toteutus suunniteltiin siten, että jätevedet pumpattiin kahden sarjaankytketyn lämmöntalteenottosiirtimen läpi kunnalliseen viemäriverkostoon. Spiraalimainen Rst-materiaalista valmistettu lämmönsiirrin on säiliössä ja jätevesi virtaa siinä alhaalta ylöspäin. Säiliöissä on kylmää vesiglykoliliuosta, jota lämmentäen pumpataan lämpöpumpun höyrystimelle uudelleen jäähdyttäväksi. Lämpöpumpun lauhdutin siirtää talteen saatua lämpöä sekä käyttöveden että lattialämmityspiirin lämmittämiseen. Lattialämmitysverkoston mitoitustehontarve on noin 200 kW ja lämpöpumpun lämpötehoksi valittiin 50 kW. Kummassakin verkostossa on varaaja kuormitushuippujen tasaamiseksi lämpöpumpun käyntijaksojen pidentämiseksi.

Laitetoimittajan energialaskelmien mukaan järjestelmällä pystytään pienentämään kaukolämmön kulutusta noin 364 MWh/v, ja lämpöpumpun, jätevesipumppujen sekä muiden pumppujen sähköntarve on yhteensä noin 85 MWh. Näiden yhteisvaikutuksena lämpöpumppujärjestelmän COP olisi noin 4,3 ja rakennuksen E-luku pienenesi noin $-5 \text{ kWh}_E/(\text{m}^2\text{a})$. Järjestelmän investointikustannusarvio on noin 123 000 € (alv 0%), josta noin 75 % kohdistuu talteenottosäiliöille ja lämpöpumppulaitteistolle. Järjestelmän elinkaarikustannukset ovat yhtä suuret kaukolämmityksen kanssa 13,3 vuoden kohdalla. Elinkaarikustannusten laskentajakson pituus oli 20 vuotta ja energian reaalin hinnan nousu oletettiin yhtä suureksi kuin reaalin laskentakorko. Esimerkkikohteen suurta lämmönsäastoa edesauttaa kohteen laajuus, talossa on 153 asuntoa. Lisäksi rakennus on lattialämmitteinen, mikä on edullista lämpöpumpun energiantuoton kannalta. Myös jäteveden pumppaaminen kahden sarjaan kytketyn spiraalilämmönsiirtimen kautta tehostaa jäteveden lämmöntalteenottoa. Laskentatulokset on kuitenkin parhaimmillaankin arvio, mitattua tietoa ei voitu saada, koska tuleva kohde on vasta suunnitteluvaiheessa.

Tarkka tieto järjestelmän tuotosta ja toiminnasta saadaan vasta silloin, kun rakennus on käytössä ja järjestelmän toimintaa pystytään mittauksin seuraamaan.

Tärkeimpänä jatkotutkimustarpeena ovat pitkäaikaiset seurantamittaukset jäteveden LTO-laitteistojen toiminnasta ja suorituskyvystä erilaisissa kohteissa. Vain niillä saadaan jatkossa luotettavaa tietoa suunnittelun tueksi. Jäteveden LTO-järjestelmille on tarvetta, koska ympäristöministeriön vuoden 2018 alussa voimaan astuneet asetukset edellyttävät uusien asuinkerrostalojen E-luvuksi 90 kWh_E/(m²a).

Toinen kiinnostava jatkotutkimuskohde liittyy työssä kuvattuun ratkaisuun, jossa jäteveden LTO-järjestelmän säiliöitä hyödynnetään rakennuksen jäähdytyksessä ja aurinkolämmön keräämisessä. Veden käyttö painottuu päiväaikaan ja noin neljänneksen verran vuorokaudesta jätevettä ei tule käytännössä lainkaan. Olisi hyvä selvittää, voisiko investointikustannuksiltaan kalliita laitteita hyödyntää nykyistä paremmin siirtämällä näistä muista lämmönlähteistä saatavaa lämpöä jäähdytyskaudella esimerkiksi lämpökaivoon.

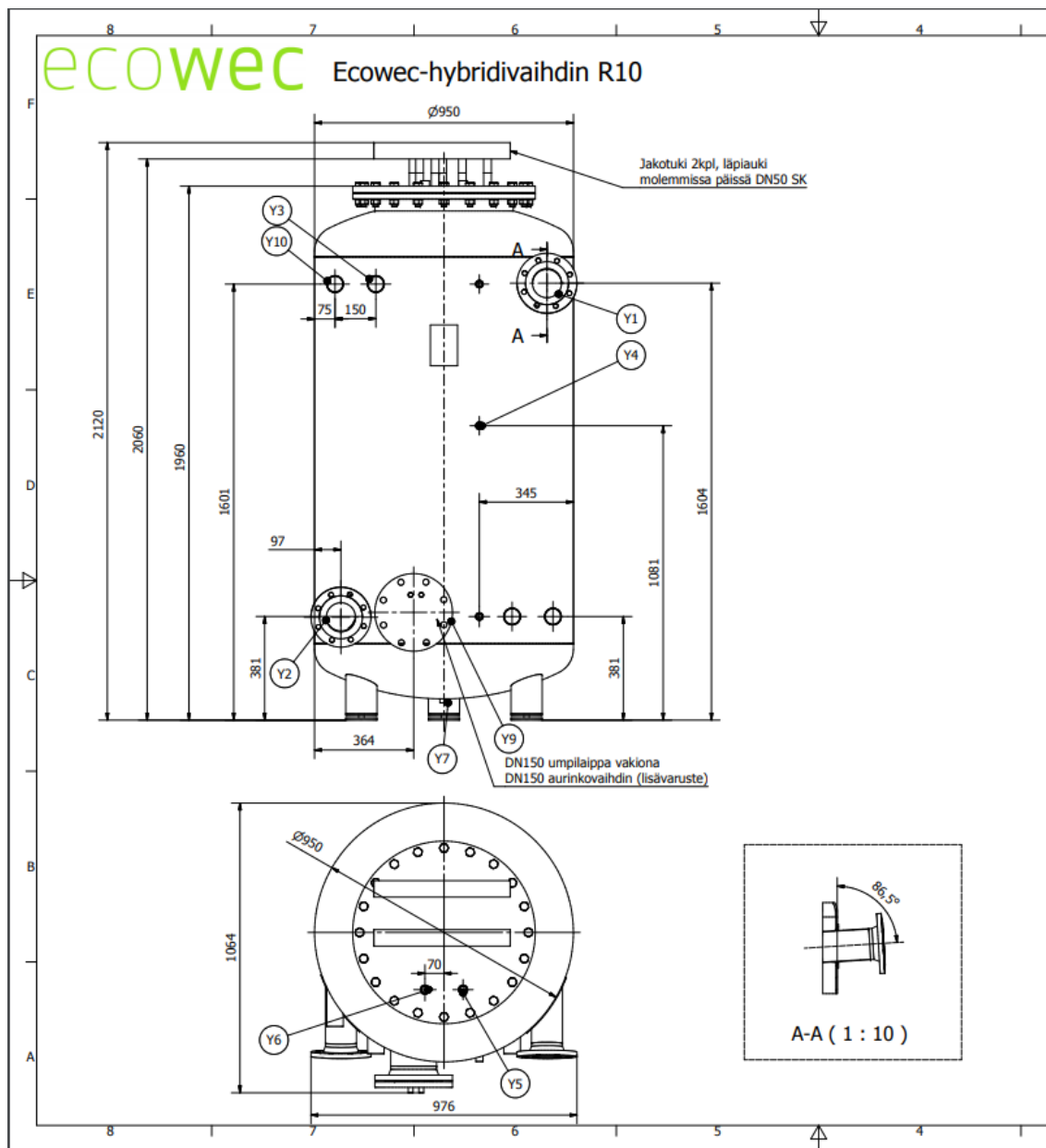
Lähteet

- 1 Suomen rakentamismääräyskokoelma. 2017. Maankäyttö- ja rakennuslaki. Verkkoaineisto. Ympäristöministeriö. <<https://www.ym.fi/rakentamismaaraykset>>. Päivitetty 23.5.2019. Luettu 14.11.2019.
- 2 Asetus uuden rakennuksen vesi- ja viemärilaitteistosta 1047/2017. 2017. Ympäristöministeriö.
- 3 Asetus kiinteistöjen vesi- ja viemärilaitteistoista. 2007. Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa D1. Ympäristöministeriö.
- 4 Jäteveden lämmöntalteenotto on nyt virallisesti uusiutuvaa energiaa. 2018. Verkkoaineisto. Euroopan unioni. <<https://ehtech.wixsite.com/eurowwhr/post/waste-water-heat-recovery-is-now-officially-a-renewable-energy-source>>. Luettu 14.11.2019.
- 5 Lainsäädäntö uusiutuvan energian edistämiseksi. 2018. Verkkoaineisto. Energiavirasto. <<https://reiluaenergia.fi/lainsaadanto/red-ii-direktiivista-suuntaviivat-uusiutuvan-energian-edistamiseksi>>. Luettu 15.11.2019.
- 6 Rakennusten kaukolämmitys. 2013. Julkaisu K1. Helsinki. Energiateollisuus ry.
- 7 Lämmönjakoverkoston vaikutus lämpöpumppuvalintoihin. 2018. Verkkoaineisto. Motiva Oy. <https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/lampopumput/lampopumppujen_hankintaopas_kunnille_ja_taloyhtioille/lampopumppujen_valinta_eri_kohteisiin/lammonjakoverkon_vaikutus_lampopumppuvalintoihin>. Luettu 8.1.2020.
- 8 Kaukolämpölaitteet. 2020. Verkkoaineisto. Helen Oy. <<https://www.helen.fi/lampo/nykyiset-asiakkaat/nykyisille-asiakkaille/kaukolampolaitteet>>. Luettu 12.1.2020.
- 9 Helenin ohje hybridikytkennästä asiakkaan kaukolämpölaitteiston rinnalle. 2015. Verkkoaineisto. Helen Oy. <https://www.helen.fi/globalassets/lampo/ammattilaiset/kaukolampo/kaukolammon_hybridikytkenta_kaukolampolaitteiston_rinnalle.pdf>. Luettu. 12.1.2020.
- 10 Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. 2018. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Ympäristöministeriö.
- 11 Kaukolämmön hinnat. 2020. Verkkoaineisto. Helen Oy. <https://www.helen.fi/lampo/kodit/hinnat?gclid=Cj0KCQiAmsrxBRDaARIsANYiD1oPAWxtELo9OEa9aH5GVWfhXWgOKRZF4aYHtRfs84bGqfJgKb1TI2caArrtEALw_wcB&gclsrc=aw.ds>. Luettu 17.1.2020.

- 12 Energiamaailman kaukolämpö. 2018. Verkkoaineisto. Energiateollisuus ry. <<https://energiamaailma.fi/mista-virtaa/kaukolampo>>. Luettu 17.1.2020.
- 13 Asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta 1010/2017. 2017. Ympäristöministeriö.
- 14 Asetus uuden rakennuksen energiatodistuksesta 1048/2017. 2017. Ympäristöministeriö.
- 15 Rakennuksen energiatodistus ja E-luvun määrittäminen. 2018. Ympäristöministeriö.
- 16 Vinha, Juha. 2010. Lämpö ja lämmönsiirtyminen RIL 255-2010. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.
- 17 Valkeapää, Aki. 2018. Luentokalvo: Lämmönsiirron perusteita. Yliopettaja, Metropolia Ammattikorkeakoulu. Espoo.
- 18 Kaappola, Esko; Hirvelä Aulis; Jokela, Matti; & Kianta, Jani. 2014. Kylmäteknikan perusteet. Helsinki: Juvenes Print- Suomen Yliopistopaino Oy.
- 19 Hakala, Pertti; & Kaappola Esko. 2011. Kylmälaitoksen suunnittelu. Tampere: Juvenes Print- Suomen Yliopistopaino Oy.
- 20 Jäteveden lämmöntalteenottojärjestelmän mitoitus. 2020. Verkkoaineisto. Ecopal Oy. <<https://www.ecopal.fi/jateveden-lto-mitoitus>>. Luettu 23.1.2020
- 21 Ecowec hybridivaihdin. 2020. Verkkoaineisto. Ecopal Oy. <<https://www.ecopal.fi/tuote/ecowec-r10-hybridivaihdin>>. Luettu 23.1.2020.
- 22 Laaksonen, Eetu. 2015. Lämpimän käyttöveden tuotanto lämpöpumpulla. Insinööri. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 23 Veden kulutus talonyhtiössä. 2020. Verkkoaineisto. Motiva Oy. <https://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/taloyhtiot/energiaeksperttitoiminta/tietoa_energian_ja_vedenkulutuksesta/vedenkulutus_taloyhtiössä>. Päivitetty 26.2.2020. Luettu 10.3.2020.
- 24 Tietomallisuunnitelmat. 2020. Hepacon Oy.
- 25 Älykkäät energiaratkaisut. 2020. Yrityksen kustannusarvio. Ecopal Oy.

- 26 Torvinen, Timo. 2017. Jäteveden lämmöntalteenoton hyödyntäminen asuinkerrostalossa. Insinöörityö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 27 Kekkonen, Timo. 2017. Lämpimän käyttöveden valmistukseen tarkoitetut hybridi-järjestelmät liitettynä kaukolämpölaitteistoon. Opinnäytetyö (YAMK). Metropolia Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 28 Raittinen, Ville. 2017. Lämmöntalteenotto asuinrakennusten jätevedestä. Insinöörityö. Oulun Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 29 Turpeinen, Antti. 2019. Jäteveden lämmöntalteenotto asuinkerrostaloissa. Insinöörityö. Tampereen Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 30 Talotekniikan elinkaarikustannukset. 2007. Verkkoaineisto. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. <<https://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2007/T2409.pdf>>. Luettu 10.3.2020.
- 31 Ecowec hybridivaihdin. 2016. Verkkoaineisto. Ecopal Oy. <<http://wasenco.com/wordpress/wp-content/uploads/2016/09/Ecowec-hybridivaihdin-asennusohje-2016.pdf>>. Luettu 10.3.2020.
- 32 IDA Indoor Climate and Energy. 2020. Verkkoaineisto. EQUA Simulation Oy. <<https://www.equa.se/fi/ida-ice>>. Luettu 10.3.2020.

Ecowec-hybridivaihdin R10, mittatiedot



Thermia Mega^L -lämpöpumppu, tekniset arvot

Mega			Mega ^M	Mega ^L	Mega ^{XL}
Kylmäaine	Tyyppi		R410A	R410A	R410A
	Paino	kg	4,1	5,7	8,7
	Koepaine	MPa	3,0/4,3	3,0/4,3	3,0/4,3
	Mitoituspaino	MPa	4,3	4,3	4,3
Kompressor	Tyyppi		Scroll	Scroll	Scroll
	Öljy		POE	POE	POE
Sähköliitännät 3-N	Jännite	Volt	400	400	400
	Nimellisteho, kompressor	kW	17,5	22,2	32,5
	Nimellisteho, kiertopumput	kW	0,7	1	1
	Sulake	A	40 A	50 A	63 A
Hyötysuhde	COP ¹		4,49	4,50	4,71
	Lämmitysteho ¹	kW	26,73	35,6	52,0
	Ottoteho ¹	kW	5,95	7,91	11,0
	SCOP (vuosihyötysuhde)		5,32 ¹¹	5,10 ¹⁰	5,30 ²
	Tehoalue ³		11 - 44	14 - 59	21 - 88
Energialuokka ohjauksella ¹²	Lattialämmitys (35°C)		A+++	A+++	A+++
	Radiaattori (55°C)		A+++	A+++	A+++
Energialuokka ilman ohjausta ¹³	Lattialämmitys (35°C)		A++	A++	A++
	Radiaattori (55°C)		A++	A++	A++
Nimellisvirtaus ⁴	Kerupiiri	l/s	1,90	2,31	3,34
	Lämmönjako	l/s	0,67	0,83	1,29
Ulk. sallittu painehäviö ⁵	Kerupiiri	kPa	84,0	111,6	77
	Lämmönjako	kPa	75,7	116	99
Sisäinen painehäviö	Lauhdutin	kPa	10,9	2,9	9,0
	Höyrystin	kPa	25,0	28,4	40,0
Max. järjestelmän paine	Kerupiiri	bar	6	6	6
	Lämmönjako	bar	6	6	6
Max/min lämpötila ⁶	Kerupiiri	°C	20/-10	20/-10	20/-10
	Lämmönjako	°C	65 ⁷ /20	65 ⁷ /20	65 ⁷ /20
Max/min kylmäainepiiri	Matalapaine	MPa	0,23	0,23	0,23
	Korkeapaine	MPa	4,3	4,3	4,3
Äänitaso ^{3,8}		dB (A)	41 - 56	46 - 61	46 - 63
Lämmönkeruuneste			Etanoli - vesiliuos -17°C ± 2 ⁹		
Paino		kg	390	430	550